

Vergleichende Untersuchungen
über die Angioarchitektonik des Kaninchenmyokards
mit besonderer Berücksichtigung
der terminalen Strombahn

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin der Hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps - Universität zu Marburg

vorgelegt von

Gerlinde Gratiana Ludwig

aus Johnsdorf (ČSR)

Marburg 1968

Vergleichende Untersuchungen
über die Angioarchitektonik des Kaninchenmyokards
mit besonderer Berücksichtigung
der terminalen Strombahn

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin der Hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps - Universität zu Marburg

vorgelegt von

Gerlinde Gratiana Ludwig

aus Johnsdorf (ČSR)

Marburg 1968

Angenommen von der Medizinischen Fakultät
der Universität Marburg am 9. 7. 1968
Gedruckt mit Genehmigung der Fakultät

Dekan : Prof. Dr. R. Siegert

Referent : Prof. Dr. G. Petry

Correferent : Prof. Dr. G.W. Löhr

Meinen Eltern
in Dankbarkeit gewidmet



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA40153508_0110

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. <u>Allgemeiner Teil</u>	1
I. Einleitung und Aufgabenstellung	1
II. Literaturübersicht	2
1. Makrozirkulation	2
2. Mikrozirkulation	2
III. Methodik der Herzgefäßdarstellung	2
1. Makroangiographie	2
2. Mikroangiographie	4
IV. Phylo- und ontogenetischer Abriß der Entwicklung des Myokards und seines Gefäßsystems	5
V. Besonderheiten des myokardialen Strombettes	7
B. <u>Eigene Befunde</u>	7
I. Material und Methode	8
II. Befunde	13
1. Makrozirkulation	13
2. Mikrozirkulatorisches Strombett	18
3. Topographische Besonderheiten der Mikrozirkulation	29
C. <u>Besprechung der Ergebnisse und Literatur- vergleich</u>	33
D. <u>Zusammenfassung</u>	60
E. <u>Literatur</u>	63

A. ALLGEMEINER TEIL

I. Einleitung und Aufgabenstellung:

Neuere physiologische Untersuchungen am isolierten, perfundierten Kaninchenherzen haben zu Ergebnissen geführt, die mit der überlieferten Vorstellung der kapillären Blutversorgung nicht in Einklang zu bringen sind. (LÜBBERS, 1958; LÜBBERS u. FABEL, 1964; FABEL, 1964, 1966; FABEL u. LÜBBERS, 1964, 1965; FABEL u. Mitarb., 1964) Daraus erhob sich die Frage nach einem dem Organ und seiner Funktion angepaßten Kapillarmuster, wobei festzustellen wäre, ob das morphologische Muster Rückschlüsse auf die Diffusionsbedingungen und den Sauerstoffverbrauch der Herzmuskelzellen zuläßt.

Da das Herz keine nennenswerte Sauerstoffschuld eingehen kann, muß man eine direkte Beziehung des Sauerstoffverbrauches mit der Kapillardichte annehmen, "da ja nicht der Sauerstoff den begrenzenden Faktor bei der Gewebsatmung darstellt, sondern Struktur und Dichte der Kapillaren" (LÜBBERS, 1958). Als ein morphologisches Substrat wurde bislang vorwiegend die Kapillardichte nach Auszählung der Querschnitte injizierter Herzmuskeln herangezogen. Anhand des hierbei festgestellten Kapillarmusters konnte man den Radius des Gewebszylinders, der von der Kapillare versorgt wird, errechnen. Keine Bedeutung wurde den Kapillarverbindungen, ihrer Länge und ihrem spezifischen Verlauf im Hinblick auf die Gewebsernährung beigemessen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Blutversorgung des Kaninchenmyokards - unter besonderer Berücksichtigung der terminalen Strombahn - auf methodisch verschiedenen Wegen dargestellt und versucht, für die physiologisch-experimentellen Befunde morphologische Korrelate zu finden. Da sich bereits bei Betrachtung der größeren Gefäße am Kaninchenherzen eine Reihe von Besonderheiten ergaben und dadurch die Beeinflussung der nachgeschalteten Strombahn diskutiert werden muß, wurde die Beschreibung der Makroangioarchitektonik mit einem kurzen Rückblick auf die Phylo- und Ontogenese an den Anfang dieser Arbeit gestellt.

II. Literaturübersicht:

1. Makrozirkulation

Die Blutversorgung des Herzens ist seit langem Studienobjekt. In einer fast unübersehbaren Anzahl von Publikationen wurden die Verteilung und das allgemeine Gefäßmuster der großen Gefäße aufgezeigt. Es handelt sich dabei vor allem um Verlauf und Verzweigungstypen der Coronararterien, ihre Normvarianten und Versorgungsgebiete, sowie Unterschiede in der Vaskularisation des Myokards zwischen Mensch und verschiedenen Tierspezies.

Weitere Interessen galten dem Vorhandensein bzw. der Ausbildung von Anastomosen, die besonders im Rahmen der Klinik der Herzpathologie im Zusammenhang mit Gefäßverschlüssen und Zirkulationskrankheiten immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Andere untersuchten den histologischen Aufbau der Gefäßwand, ihre morphologisch-funktionellen Besonderheiten und pathologischen Veränderungen. (HYRTL, 1873; JAMIN u. MERKEL, 1905; SPALTEHOLZ, 1907, 1908, 1909, 1924; AMENOMIYA, 1910; NUSSBAUM, 1912; GROSS, 1921; CRAINCIANU, 1922; KRETZ, 1927; BENNINGHOFF, 1930; BENNET, 1936; SCHLESINGER, 1938; HIRSCH, 1942; BUCHER, 1944, 1945, 1947; SCHOENMACKERS, 1949, 1960; KAZAZ u. Mitarb., 1950; JOHNS u. Mitarb., 1950; MYCZKOWSKI, 1950, 1960; STAUBESAND, 1955; BAROLDI u. Mitarb., 1956; KADAR, 1956, 1963; MÜLLER-MOHNSEN, 1957; HEGAZI, 1958; DAY u. Mitarb., 1958; POLACEK, 1960; POLACEK u. Mitarb., 1961; CHRISTENSEN, 1962; BOUCEK u. Mitarb., 1963, 1965; SCHMIDT u. Mitarb., 1966.)

2. Mikrozirkulation

Das mikrozirkulatorische Bett des Herzens wurde, im Gegensatz zur Darstellung an anderen Organen, nur spärlich abgehandelt. Diejenigen Studien, die sich mit dem Kapillarbett des Myokards befaßten, waren vornehmlich auf das Verhältnis Kapillare : Muskelfaser ausgerichtet (WEARN, 1928; DRY, 1935; SHIPLEY u. Mitarb., 1937). Erst in neuerer Zeit trat das Gebiet der terminalen Strombahn mit ihren Besonderheiten in physiologischer, morphologischer, pharmakologischer und histochemischer Hinsicht mehr in den Vordergrund des Interesses. (HOERR, 1947; LINZBACH, 1947 a, b, 1950, 1958, 1960; TRUEX u. Mitarb., 1951, 1952; HORT, 1953, 1955, 1960; LÜBBERS u. BARBEY, 1954; HORT u. HORT, 1958; REYNOLDS u. Mitarb., 1958; PROVENCA u. SCHERLIS, 1959; MARCHESI u. Mitarb., 1963; ANGELKOS u. Mitarb., 1964; CLARKE, 1965; BROWN, 1965.)

III. Methodik der Herzgefäßdarstellung:

1. Makroangiographie

Trotz der Vielzahl an Methoden, die in den letzten Dezennien zur Gefäßdarstellung ausgearbeitet wurden, behält SPALTEHOLZ

(1924) recht, wenn er sagt, daß "jeder, der sich mit der Darstellung des Gefäßsystems befaßt hat, weiß, wie launisch sie ist und wie schwer es trotz Anwendung aller technischen Kunstgriffe ist, eine gleichmäßige Injektion eines ganzen Organs zu erzielen... und das Herz gehört jedenfalls nicht zu denjenigen, welche sich gut und leicht injizieren lassen".

Der Wunsch, die Gefäße in ihrer räumlichen Anordnung zu sehen, ist fast so alt wie die Injektionsmethode selbst. Für die Raumdarstellung der Gefäße stehen drei Methoden zur Verfügung:

- a) die Injektion des Gefäßbaumes mit gefärbten Massen und die anschließende Aufhellung
- b) die Korrosion, bei der die Gefäße durch Entfernung der Weichteile sichtbar gemacht werden
- c) die postmortale Angiographie.

An die Substanzen, die injiziert werden sollen, müssen folgende Grundforderungen gestellt werden:

Sie müssen flüssig sein oder durch Aufschwemmungs- oder Lösungsmittel injizierbar gemacht werden. Sie dürfen die Gefäßwand nicht angreifen oder durch sie hindurch perfundieren. Ferner dürfen sie nicht sedimentieren oder wieder abfließen. Bei nachfolgenden Prozessen, wie Fixation, Aufhellung, Anfertigung von Schnitten oder bei Spezialfärbungen darf keine wesentliche Veränderung auftreten. Normalerweise werden als Vehikel benutzt Wasser, Glycerin, Gelatine oder Gummi arabicum. An Farbstoffen (als Suspension oder als Lösung) hat sich am besten chinesische Tusche bewährt. Bei dieser Methode erhält man die klarsten Bilder; sie ist chemisch unangreifbar, haftet fest an der Gefäßwand und läßt jede Art der histologischen Nachbehandlung zu. Ebenso zu empfehlen sind Anilinfarben, wie Berliner Blau oder Karmin. Zur Korrosion wurden früher Metalle als Ausgußmaterial, heute Kunstharze oder Kautschukabkömmlinge verwendet. Sie lassen sich in flüssigem Zustand injizieren und verfestigen sich durch Polymerisation. SCHUMMER führte 1935 das Plastoid in die Korrosionstechnik ein, was noch heute neben anderen synthetischen Stoffen, wie z. B. Vinylit (LIEBOW u. Mitarb., 1947) oder Latex PHE BAYER u.v.a.m. große Anwendung findet. Das umgebende Gewebe wird nach Festigung der Injektionsmasse durch Mazeration mit Kalilauge entfernt.

Neuerdings gewinnt die postmortale Angiographie mehr an Bedeutung. Bereits 1905 liegen von JAMIN u. MERKEL hervorragende Stereoröntgenogramme der Coronararterien vor. Eine modifizierte Methode sowie vollständige Darstellung der Herzgefäße durch Dissektions- und Abrollverfahren gibt SCHOENMACKERS (1949, 1960) an.

2. Mikroangiographie

Während in den meisten Fällen der Herzgefäßdarstellung das Vordringen des Injektionsmittels bis in das Kapillarbett unerwünscht war, entweder um die Klarheit des Bildes nicht zu beeinträchtigen, oder um das Auffinden von Anastomosen zu erleichtern, wurde die Viskosität des Injektionsmittels je nach Bedarf verändert. Indes bereitet die gezielte Darstellung der kleinsten Gefäße und Kapillaren, speziell am Herzen, erhebliche technische Schwierigkeiten.

- a) Die alleinige Darstellung und Beurteilung der Haargefäße in ihrem physiologischen Milieu bietet die Vitalmikroskopie bzw. die Endoskopie. Sie hat den Vorteil der Betrachtung des Kapillarbettes im lebenden Gewebe, gleichzeitig der Strömungsrichtung und des Gefäßwandspieles (BRANEMARK, 1964). Am Endo- und Epikard des Kaninchenherzens führte FABEL (1965) vitalmikroskopische Untersuchungen durch.
- b) Durch die selektive Anfärbung der Erythrozyten (CROSSMON, 1940) gelingt es, die Kapillaren von den vorgeschalteten Arteriolen zu unterscheiden.
- c) Eine weitere Darstellung der feinen Blutgefäße und ihres Inhaltes gibt die Benzidin-Methode von SLOMINSKI (1927).

Die drei genannten Methoden lassen allerdings nur die Betrachtung der terminalen Strombahn an oberflächlichen Schichten bzw. an häutchenförmigen Präparaten oder dünnen Schnitten zu.

- d) Die Tuschinjektion hingegen, unverdünnt, oder verdünnt mit physiologischen Lösungen, mit Serum sowie Gelatine, stellt sozusagen die Routinemethode dar. Als ebenso geeignet wird die Darstellung mittels Berliner-Blau-Gelatine-Injektion angegeben.
- e) Neuerdings ist es möglich, mit einer Feinstfokusröhre die kleinsten Abschnitte der Strombahn darzustellen. (CLARKE, 1965).
- f) Auch verschiedene histochemische Methoden sind gelegentlich zur Darstellung der enzymatischen Aktivität der Kapillarwand herangezogen worden.

Autoren mit großer Injektionserfahrung weisen besonders darauf hin, "daß man nach Anwendung der Injektionsmethode einen Gefäßausguß vor sich hat, bei dem man diagnostisch fast ausschließlich auf den Verlauf und das Kaliber der betreffenden Gefäße angewiesen ist, d.h. die Möglichkeit der Wandbeurteilung tritt völlig in den Hintergrund. Hinzu kommt, daß bei den meisten Gefäßinjektionen das Verhalten des Kreislaufs zur

Zeit des Eingriffs, der Austritt des Narkosemittels und vor allem die Reaktion der terminalen Strombahngefäße auf die injizierten und meist völlig unphysiologischen Massen unberücksichtigt bleibt". (STAUBESAND, 1956). Die unterschiedliche Viskosität der Injektionsmittel zwingt darüber hinaus zu unphysiologischen Injektionsdrucken. Ein weiterer Faktor, der sich vor allem bei metrischer Auswertung injizierten Gewebes äußerst störend auswirkt, ist die starke Schrumpfung des Gewebes bei verschiedenen histologischen Aufarbeitungsmethoden, wodurch komplizierte Umrechnungen nötig werden. (HORT, 1961).

Bei der Auswahl des Materials speziell für die Darstellung der Kapillaren ist es erforderlich, solche Substanzen auszuwählen, die suspendierte Partikel von Größenordnungen enthalten, die die Kapillaren ohne Schwierigkeit passieren können; ebenso darf die Gesamtviskosität des Mediums die Kapillarpassage nicht beeinträchtigen. Ein weiterer Faktor ist der pH-Gehalt der Injektionslösung. Die Kolloidalität der Lösung muß unbedingt gewahrt sein, da es sonst zur Ausbildung von Mikroembolien kommen kann. Dazu empfehlen STAUBESAND u. STOCKENIUS (1957) als Emulgator TWEEN 20 BAYER, der gleichzeitig als Netzmittel wirkt. Um den oben angeführten starken Schrumpfungsfaktor, der vorwiegend bei der Formalinfixierung auftritt und nach HORT (1961) bis zu 17 % betragen kann, möglichst gering zu halten, empfiehlt es sich, die Präparate, die zu metrischer Auswertung verwendet werden, in Gelatine einzubetten und Gefrierschnitte anzufertigen.

IV. Phylo- und ontogenetischer Abriß der Entwicklung des Myokards und seines Gefäßsystems:

Die Myokardentwicklung vollzieht sich vom kontraktilem Mantelrohr über das Stadium einer dünnen Außenschale (Kompakta) mit einem inneren muskulösen Schwammwerk (Spongiosa) zur definitiven Form mit Septen, Papillarmuskeln und Trabeculae carneae als Reste des ehemaligen Schwammwerkes.

Auch die Blutversorgung des Myokards erfährt sowohl phylo- als auch ontogenetisch einen tiefgreifenden Umbau. Die ursprüngliche alleinige Ernährung vom Lumen her wird von der "sinusoida-

len Zirkulation" bis zur Ausbildung des herzeigenen Gefäßsystems übernommen.

Als erste Gefäße breiten sich die Herzvenen vom Sinus venosus subepikardial aus. Erst zu einem späteren Zeitpunkt sprossen die Koronararterien von der Aorta aus und dringen, zunächst schlingenförmig, dann sich baumartig aufzweigend in die Muskelwand vor. Kommunikationen mit den Sinusoiden werden nur in seltenen Fällen beobachtet (BENNETT, 1936). Mit der zunehmenden Entwicklung der mittleren Herzmuskelschicht tritt eine von epikardial nach luminal gerichtete Regression der Sinusoide ein; ihre freie Verbindung mit dem Lumen wird durch Überlagerung mit subendokardialem Gewebe verschlossen (BENNINGHOFF, 1930, 1931). Zu dem Zeitpunkt, an dem die Kapillaren bis unter das Endokard vorgespßt sind und die Ernährung des Myokards übernommen haben, ist das beim Säuger bekannte adulte Muster erreicht.

Während die Herzvenen von vornherein bei allen Tierspezies subepikardial angelegt werden, bieten die Koronararterien in ihrer phylogenetischen Entwicklung weitere topographische Besonderheiten. Sowohl BERG (1965) als auch andere Autoren vertreten auf Grund ihrer umfassenden Untersuchungen die Auffassung, daß sich die Entwicklung der Herzarterien vom völlig intramyokardialen Verlauf über das Zwischenstadium der Muskelbrücken in die definitive subepikardiale Lage vollzieht. Der intramyokardiale Verlauf der Koronararterien stellt den ursprünglichen primitiven Zustand dar, der subepikardiale dagegen entspricht dem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. In der Aszendenz der Tierreihe stellen die Marsupialia, Insectivoren, Rodentia und Lagomorphen Träger des phylogenetisch älteren koronaren Versorgungsmusters dar, während erst die Carnivoren diesen Rahmen sprengen.

Ein weiteres Kriterium eines relativ primitiven Gefäßmusters stellt die Beziehung der Koronararterien zu den Interventrikularfurchen dar; das gleiche gilt für den Aufzweigungsmodus der Stammgefäße. Auch im Bereich der Abflußwege des venösen Blutes wird wiederum der tiefgreifende Wandel, bedingt durch komplizierte Herzentwicklung, und seine funktionelle Anpassung deutlich.

Das gesamte venöse Blut der embryonal beiderseits gleich stark ausgebildeten Ventrikelwände gelangt über die subepikardial verlaufenden Venen in den Sinus venosus und so in den rechten Vorhof. Postnatal kommt es im Bereich des rechten Ventrikels zu einer Wegverkürzung des Venenverlaufs und damit zu direkter Blutabgabe in die Herzhöhlen: 1. über subepikardial verlaufende Venen, die isoliert in den rechten Vorhof einmünden. 2. durch Reduktion des "Sinus-Kollektorsystems" (MECHANIK, 1934) und Umbau in ein intramurales System.

V. Besonderheiten des myokardialen Strombettes:

Neben der in ihrer Häufigkeit, topographischen Anordnung, Kaliber- und Spezies-Unterschieden vorkommenden interarteriellen und intervenösen Verbindung, sowie arterio-venösen Kurzschlüssen stellen die sogenannten Venae minimae (Thebesische Venen) ein viel diskutiertes Problem im Hinblick auf die retrograde Ernährung des Myokards bei arteriellen Verschlüssen dar (WEARN, 1928 a; BENNETT, 1936; PUFF, 1964). Die Bedeutung der "venösen Sinus", das Vorhandensein von "arterioluminalen" und "arterio-sinusoidalen" Gefäßen wird in der Literatur sehr widersprüchlich behandelt. (WEARN, 1928 a, b; BENNETT, 1936; TRUEX u. Mitarb., 1951, 1952; RUSHMER, 1961; BROWN, 1965). Wie vielseitig die Gestalt des myokardialen Gefäßbettes sein kann, zeigen Abb. 1 a und 1 b.

B. EIGENE BEFUNDE

Das Kaninchenmyokard und seine Gefäßversorgung waren - im Vergleich zu Untersuchungen an anderen Säugetieren - nur selten Untersuchungsobjekt. GRANT (1926) beschreibt die Entwicklung der Koronargefäße, WEARN (1928 b) das Verhältnis Kapillaren zu Herzmuskelfasern, SHIPLEY u. Mitarb. (1937) vergleicht die Kapillarisation am normalen und hypertrophierten Kaninchenmyokard. Der makroskopische Gefäßbaum des Kaninchens wird in den Arbeiten von DAY u. JOHNSON (1958), MYCKOWSKI (1950, 1960), POLAČEK (1960) sowie POLAČEK u. AUDRLITZKA (1961) erwähnt.

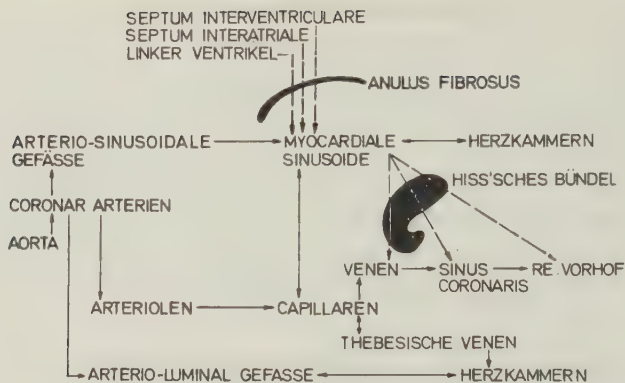


Abb. 1 a

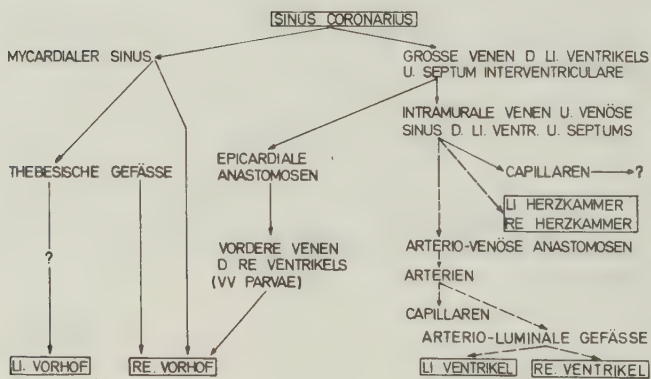


Abb. 1 b

Abb. 1 a u. 1 b: Verbindungsmöglichkeiten im arteriellen und venösen Herzgefäßsystem (in Anlehnung an TRUEX u. Mitarb. 1951, 1952).

1965 beschreibt FABEL das subendo- und subepikardiale mikro-zirkulatorische Gefäßbett.

I. Material und Methode:

Das Herz des Kaninchens ist wegen der schmalen Form des Brustkorbes steilgestellt und liegt weit kranial. Das Herzgewicht beträgt 0,2 - 0,4 % des Körpergewichtes. Die Farbe der Herzkammern ist braun-rot, die Herzohren erscheinen beim nicht entbluteten Tier auffallend dunkelblau-rot. Der mittlere Blutdruck beträgt 120 mm Hg (CHING-YUEN-LEE, 1958), die Herzfrequenz 120 - 150 Schläge/min, die Atmung 76 - 132 Züge/min, die Temperatur 38,5 - 39,5 °C. Die vorliegenden Untersuchungen wurden an 30 gesunden, erwachsenen Kaninchen durchgeführt; eine Auswahl nach Rasse und Geschlecht wurde nicht getroffen. Das durchschnittliche Körpergewicht dieser Tiere betrug 3,5 kg, das mittlere Herzgewicht 10,5 g. Die Operationen wurden z. T. an narkotisierten, z. T. an entbluteten, durch Nackenschlag getöteten Tieren vorgenommen. Als Narkosemittel wurde Nembutal oder Evipan intraperitoneal oder intravenös verwendet. Zur Vermeidung intravasaler Thrombosen wurden jedem lebenden Tier 0,25 - 0,5 ml (1250 - 2500 E) Heparin i.v. oder intraarteriell appliziert. Als Perfusionsmittel standen Tyrode- oder Ringerlösung sowie Haemaccel zur Verfügung. In einigen Fällen wurden dem Haemaccel entweder nur Glukose (0,495 g) oder zusätzlich noch 0,042 g NaH_2PO_4 , 0,051 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, sowie 0,960 g NaHCO_3 zugesetzt. Die Perfusionslösungen wurden mit Sauerstoff durchperlt. Zur Vermeidung von Gefäßspasmen, bzw. zur Gefäßdilatation wurden dem Perfusat Amylnitrit (5 Tropfen auf 100 ml) zugesetzt, oder dem Tier 0,2 ml Papaverin intravenös appliziert. Zur Rhythmusstabilisierung wurde in einem Fall Adrenalin (1:1000) verabreicht.

Nach Narkoseverabreichung bzw. Tötung durch Nackenschlag wurde eine linksseitige Thorakotomie durchgeführt, der Brustkorb breit eröffnet und die Aorta descendens freipräpariert. Danach wurde in die Aorta ein Teflonkatheter eingebunden. Am besten geschieht die Katheterisierung von der Aorta descendens aus, d.h. in genügender Entfernung von den Aortenklappen, um die Öffnung der Koronararterien, auch bei normalem Abgang, nicht zu blockieren. Die Aorta distal vom Katheter wird ligiert. Alle anderen zu- und abführenden Gefäße werden ebenfalls mit Ausnahme der V. cava sup. unterbunden bzw. abgeklemmt, um den Abfluß des Blutes bzw. später des Perfusions- oder Injektionsmittels aus dem Sinus coronarius beurteilen zu können. Das auf diese Weise skelcttierte Herz wird sofort nach Entnahme in ein Gefäß mit 37 - 38 °C warmer physiologischer Lösung gelegt und die Perfusion begonnen; sie wird solange fortgesetzt, bis das Herz blutfrei ist, was an dem Bläwerden des Myokards zu verfolgen ist. Die Höhe der Perfusionsflüssigkeit imitiert den systolischen Blutdruck. Äußerst wichtig ist die Vermeidung von Luftblasen bei der Perfusion und nachfolgenden Injektionen. Ferner müssen beide Koronararterien unter gleichem Druck gefüllt werden. Eine isolierte Katheterisierung der Koronararterien war wegen der Kleinheit des Untersuchungsobjektes nicht möglich.

An unnarkotisierten Tieren kommt es in Übereinstimmung mit WEARN (1928 b) und BROWN (1965) schon bald nach Perfusionsbeginn zu kräftigen, gleichmäßigen Herzkontraktionen, während die Herzaktionen bei narkotisierten Kaninchen nur selten die normale Schlagfrequenz und Rhythmus erreichen.

Bei einer Reihe von Tieren wurden die Perfusion und anschließende Injektion über den Aortenkatheter in situ ausgeführt, während nur die Vena cava inf. durchtrennt war. Dadurch sollten nach Möglichkeit nervale Reize, die Gefäßkontraktionen herbeiführen können, ausgeschaltet werden. Von großer Wichtigkeit ist ferner, daß das Herz so wenig wie möglich instrumentell oder mechanisch beeinflußt wird, da überaus leicht Stellen mangelnder Kapillarfüllung resultieren.

Die Versuchsanordnung zeigt Abb. 2

Zur Injektion selbst wurden mehrere Wege beschriftet. Als Injektionsmittel wurden verwendet:

- 1) unverdünntes Skribtol
- 2) eine spezielle Gefäßtusche von Günter Wagner (Fabrik.-Nr. 11/1431 e)
- 3) Skribtol 1 : 2 mit Ringerlösung verdünnt, mit einem Zusatz von einigen Tropfen TWEEN 20 BAYER als Emulgator (Angaben von STAUBESAND u. STÖCKE-NIUS (1957))
- 4) Skribtol unverdünnt mit Zusatz von Formalin
- 5) Skribtol 1 : 2 mit Kaninchenserum vermischt
- 6) Berliner-Blau-Gelatine* mit Zusatz von TWEEN als Emulgator
- 7) Berliner Blau und Carmin-Gelatine zur getrennten Darstellung von Arterien und Venen
- 8) Plastoid

Vorgehen I (Methode nach BROWN (1965) am schlagenden perfundierten Kaninchenherzen): Sobald das Herz völlig blutleer ist - sichtbar an der blassen Farbe - wird die Perfusion gestoppt und mit der Injektion von Tusche begonnen. Der Injektionsdruck entspricht dem systolischen Blutdruck. Die Tusche muß vorher mehrfach filtriert werden, um Mikroembolien zu vermeiden. Unmittelbar vor Injektion wird der Tusche 40 % Formalin in 2 %iger Konzentration zugesetzt; es ergibt schnellere Fixation und verhindert die Autolyse. Das Injektionsmittel gelangt nun über die Aorta in die beiden Koronararterien und weiter in die Gefäße des Myokards, indem diese sich quasi selbst weiterinjizieren. Bei der ersten Diastole sieht man beim Kaninchenherzen, im Gegensatz zu den von WEARN (1928 b) und BROWN (1965) untersuchten Tieren, deren Koronararterienäste subepikardial verliefen, keine Darstellung der Arterien. Erst bei der folgenden Diastole, bei der sich das Kapillarbett auffüllt, nimmt das Herz

* Zusammensetzung nach brieflicher Mitteilung von HAMMERSEN.

eine gleichmäßige schwarze Farbe an, und damit erscheint auch die Tusche in den Venen der Herzoberfläche. Um eine maximale Füllung der Kapillaren zu erreichen, injiziert man noch ein wenig weiter. Die Kontraktionen hören dann nach 1 bis 2 folgenden Schlägen von selbst auf. Andernfalls kann man, um ein Leerschlagen des Herzens zu vermeiden, zu der letzten Injektionsmenge Kaliumchlorid oder Chloralhydrat zusetzen. Das Herz bleibt dann in extremer Diastole stehen. Anschließend wird dann der Sinus coronarius bzw. die Vena cava abgeklemmt.

Vorgehen II: Injektionen mit Berliner-Blau-Gelatine wurden am isolierten, lebensfrischen Herzen durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, daß die Temperatur des Injektionsmittels $37 - 38^{\circ}\text{C}$ beträgt, da hierbei die Gelatine flüssig, d.h. gut injizierbar und kapillardurchgängig ist und gleichzeitig der Bluteigentemperatur entspricht. Um die Gefäßkontinuität nicht zu stören, müssen Luftblasen vermieden werden. Während bei der Tuscheinjektion der physiologische Druck von 120 - 150 mm Hg ausreicht, muß er bei der Injektion auf Gelatinebasis ins Unphysiologische gesteigert werden. Die Injektion selbst erfolgt mit einer Rekordspritze, der Injektionsdruck wird so weit variiert, daß einerseits eine vollständige Injektion der Kapillaren erfolgt, andererseits aber Extravasate vermieden werden.

Vorgehen III: Doppelinjektionen, vom Sinus coronarius aus und gleichzeitig über die Aorta, sind problematisch, da ja das flüssigkeitsgefüllte Kapillarbett von zwei Seiten her komprimiert wird. Wir haben diese Methode lediglich zur Unterscheidung praekapillarer Venen und Arterien durchgeführt.

Vorgehen IV: Die ältere, für Gefäßinjektionen angegebene Methode, das Herz nach Durchspülung zu entnehmen und für etwa 24 Std. in den Kühlschränk zu legen, damit die Totenstarre bei nachfolgender Injektion mit Sicherheit gelöst ist, hat bei uns sehr gute Injektionsresultate mit der Tuscheinjektion ergeben.

Vorgehen V: Um eine pralle Füllung sowohl des gesamten Kapillargebietes als auch der Herzvenen zu erreichen, haben wir das Herz in situ gestaut, indem wir beide Venae cavae und die A. pulmonalis unterbanden. Dadurch traten die subepikardial gelegenen großen Venen, sowie die isoliert in den rechten Vorhof mündenden Venae parvae deutlich hervor.

Vorgehen VI: Drei Herzen wurden nach dem Verfahren von SCHUMMER (1935) mit Plastoid injiziert. Es wurden sowohl der arterielle und venöse Gefäßbaum durch Doppelinjektion als auch das arterielle Gefäßgebiet isoliert zur Darstellung gebracht.

Vorgehen VII: Sowohl von Tusche-als auch von Berliner-Blau-Gelatine-injizierten Herzen wurden Aufhellungspräparate hergestellt. Die Aufhellungsflüssigkeit bestand aus 5 Teilen Wintergrün-Öl und 2 Teilen Methylbenzoat. Die einzelnen Herzteile wurden in toto in Bioplastik eingebettet. Dieses

Material ergibt nach Polymerisation glasklare Blöcke, die eine Betrachtung des eingeschlossenen Objektes von allen Seiten gestatten.

Vorgehen VIII: An einer weiteren Serie wurden histochemische Untersuchungen (ATP-ase-Reaktion nach PADYKULA u. HERMAN (1955), sowie die alkalische Phosphatase nach GOMORI (1939) durchgeführt. Die Herzen wurden körperwarm entnommen und 15 - 20 μ dicke Kryostatschnitte angefertigt.

Histologische Weiterbehandlung der injizierten Herzen:

- 1) Die tuscheinjizierten Herzen wurden kurz in Formalin fixiert, danach die Ligaturen entfernt, die Herzkammern unter fließendem Wasser von Tusche gereinigt und nochmals 48 Std. fixiert und nach anschließender Dissektion in Paraffin eingebettet.
- 2) Die gelatineinjizierten Herzen wurden kurzzeitig in eiskühlem Formalin, danach bei Zimmertemperatur weiterfixiert und anschließend in Gelatine eingebettet und dicke Gefrierschnitte angefertigt. Die Gelatineeinbettung hat den Vorteil der geringen Schrumpfung des Objektes und läßt am ehesten Längenbeurteilungen zu.

Dissektion:

Nach abgeschlossener Fixierung wurden die Vorhöfe in der Atrioventrikularfurche unter Schonung der dort ihrem Anfangsteil verlaufenden Koronararterien abgesetzt. Nach Abtragung der rechten Ventrikel- sowie der linken Kammerwand - in Zusammenhang mit den Papillarmuskeln - erhält man das Septum mit seinem myokardialen Übergang auf die Ventrikelmuskulatur. Von beiden Vorhöfen wurden ebenfalls Wandteile entnommen. Das halbmondförmige Gebiet des Sinusknotens wurde isoliert entfernt (Abb. 3).

Die Ausrichtung des Präparates bei der Einbettung erfolgte derart, daß die spätere Schnittebene parallel zu der Muskelfaserverlaufsrichtung verläuft, um so die Kapillaren auf möglichst große Strecken verfolgen zu können. Die Serienschnitte hatten eine Dicke von 20 bis 120 μ , wobei sich zur Gefäßbeurteilung, Verlauf und Kapillaranordnung eine Dicke von 80 μ als optimal erwies.

Es gelang uns nicht, vom Herzen feine Muskellagen abzupräparieren, wie es HAMMERSEN (1964) am Skelettmuskel durchführte.

Die Korrosions- und Aufhellungspräparate dienten vorwiegend zur Beurteilung des makroskopischen Gefäßbaumes.

Färbungen:

In Xylol aufgehellte und in Balsam eingedeckte Schnitte ohne Gegenfärbung ergaben die klarsten Bilder. Zur Wandbeurteilung eignet sich am besten die Kernechtrotfärbung, sowie die Elastika-Färbung nach UNNA (Orcein-Methode) und die Resorzin-Fuchsin-Färbung nach WEIGERT. Die Trichromfärbung nach MASSON-GOLDNER eignet sich hervorragend am Stauungspräparat zur Darstellung der Erythrozyten und der bindegewebigen Herzzinnenstrukturen.

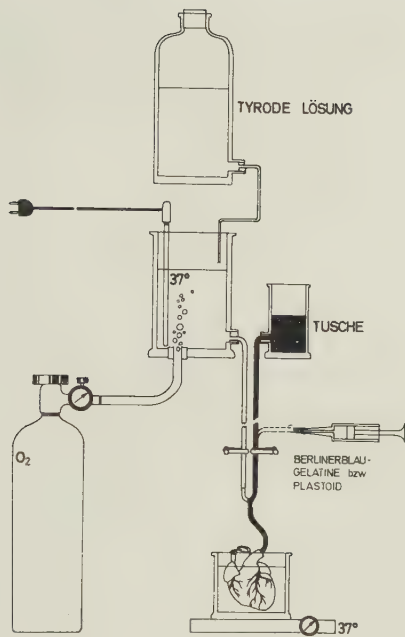


Abb. 2. Versuchsanordnung

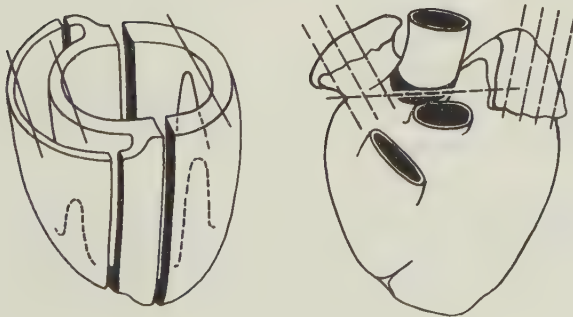


Abb. 3. Dissektionsschema

Grenzen der Methodik:

Bei jeder der angewandten Methoden mußten injizierte Herzen wegen unvollständiger Kapillarbettfüllung verworfen werden. Obwohl sie makroskopisch das Bild einer kompletten Injektion boten, zeigten sich erst nach Dissektion nur die subepikardialen Schichten angefärbt, während die inneren Muskellagen entweder ein streifiges Bild boten oder gänzlich uninjiziert geblieben waren. Auffallenderweise war das Versorgungsgebiet der rechten Koronararterie davon nicht betroffen, d.h. die ganze rechte Ventrikelwand, einschließlich der subendokardialen Muskellagen waren kapillargefüllt.

Für die mangelhafte Füllung des linken Ventrikels müssen folgende Gründe zur Diskussion gestellt werden:

- 1) Embolien infolge zu grobdispersen Injektionsmaterials
- 2) Zu hoher linksseitiger Ventrikellumendruck: da ja die Aortenklappen bei der Injektion nicht immer völlig dicht schließen, vor allem dann, wenn der Injektionsdruck (bes. bei der Gelatineinjektion) höher gehalten werden muß. Das Injektionsmittel gelangt dann in die linke Kammer, weitet sie stark aus und komprimiert die intramuralen Gefäße. Dabei ist der Druck im Ventrikellumen größer als in den Endstrecken der Koronararterien.
- 3) Der linksseitige Füllungsdefekt kann durch das Auftreten von Gefäßspasmen in der linken Kranzarterie bzw. deren kleineren Ästen bedingt sein.
- 4) Ein Endothelödem bei zu langer Perfusion oder unexakter Homöostase.
- 5) Verbindungen zwischen zu- und abführenden Gefäßen, die einen geringeren Widerstand als die Muskelkapillaren haben. Dabei müßte es sich um praekapilläre arteriovenöse Anastomosen handeln, zumal das Injektionsmittel quantitativ aus dem Sinus venosus abgeflossen war.
- 6) Ein systolischer Herzstillstand, wobei die Kontraktion des Myokards so groß ist, daß ein Durchtritt des Injektionsmittels zur Herzinnenschicht unmöglich wird.
- 7) Der Abfluß des Injektionsmittels via Thebesische Venen.
- 8) Da diese Füllungsdefekte bei unseren Präparaten auch bei Injektionen am perfundierten, schlagenden Herzen auftreten, wäre auch an einen bereits eingetretenen hypo- oder anoxämischen Innenschichtschaden zu denken.

Erhebliche Schwierigkeiten ergaben sich bei der photographischen Darstellung der terminalen Strombahn des Herzens. Sie beruhen einerseits auf der überaus dichten Vaskularisierung des Myokards, der komplexen Muskelanordnung und der vorwiegend dreidimensionalen Aufteilung der Herzgefäße.

Darüberhinaus bringt das Mikrophotogramm immer nur eine Bildebene scharf zur Darstellung. Durch die erforderliche Schnittstärke (80 μ) wirkt dann das Bild verwaschen und überlagert. Rekonstruktionen anhand von Serienphotos aus verschiedenen Schichthöhen einer Stelle sind äußerst mühsam und ohne den gewünschten Erfolg. Dadurch wird die graphische Darstellung

sehr erschwert und erlaubt lediglich schematische Zeichnungen bzw. subjektive Deskription.

Bei den angegebenen Meßwerten handelt es sich um relative Angaben, da die Schrumpfung einbezogen werden muß, die je nach technischer Aufarbeitung verschiedene Werte erreicht.

II. Befunde:

1. Makrozirkulation

Bei den am Kaninchenherzen durchgeführten Injektionen fiel auf, daß die in der ersten Diastole zu erwartende Füllung der Arterienäste ausblieb, während sich die Herzwandungen bereits bei der folgenden Diastole mit dem Injektionsmittel angefärbt hatten, d.h. kapillargefüllt waren. Gleichzeitig traten die großen Herzvenen deutlich in ihrer subepikardialen Lage hervor.

Die makroskopische Betrachtung der injizierten Herzen zeigt, daß die Koronararterien in ihrer ganzen Ausdehnung - mit Ausnahme ihres Anfangsteiles, der subaurikulär liegt und dadurch verdeckt erscheint - mehr oder weniger tief intramural liegen müssen, was die nachfolgenden histologischen Schnittpräparate bestätigen. Diese Verlaufsform entspricht dem Typ A nach der Einteilung von POLACEK u. AUDRLITZKAJA (1961).

Nicht nur die Lage, sondern auch der Verlauf und der Aufteilungsmodus der großen Herzgefäße, insbesondere der Arterien, unterscheiden sich beim Kaninchen ganz wesentlich von dem des Menschen und anderen Säugern. Die Koronararterien folgen nicht den schwach ausgebildeten Atrio- bzw. Interventrikularfurchen. Nach Literaturangaben ist dieser Zustand neben den Lagomorphen (Kaninchen, Hase) auch noch bei den Insektivoren und Rodentia erhalten (BERG, 1965). Die primitive strauchartige Verzweigung der Kranzgefäße ist zwar bei den Lagomorphen bereits einer klassischen Zweiteilung der A. coronaria sinistra gewichen, die Weiteraufzweigung unterscheidet sich allerdings noch recht erheblich von dem klassischen Muster der höheren Säugetiere.

An unseren Plastoid-Korrosionspräparaten sowie den Berliner-Blau-Gelatine-injizierten und aufgehellten Präparaten stellten wir folgende Verlaufs- und Aufzweigungsmodi für die Koronararterien fest: Von den aus der Aorta entspringenden Koronararterien

ist die linke meist stärker als die rechte. Es handelt sich also um einen Linksversorgungstyp. Die A. coronaria sinistra verläuft nur auf einer kurzen Strecke subepikardial und teilt sich dann sofort in einen Ramus interventricularis paraconalis (entspricht dem R. desc. ant.), der jedoch nicht in der eigentlichen Interventrikularfurche, sondern schräg über die vordere Ventrikelfläche verläuft (Abb. 4 b). Der Ramus interventricularis paraconalis (R. desc. ant.) ist im Gegensatz zu anderen Tierspezies nur ein dünnkalibriges Gefäß. Ein kleiner Ast versorgt konstant den Conus arteriosus des rechten Ventrikels (Abb. 4 a). Von diesem Ramus interventricularis paraconalis zweigt sich sofort ein durch seine Größe und Konstanz auffallender Septumast ab (Abb. 4 a, b, 5), der bei einem unserer Präparate sogar direkt aus dem Stammgefäß der linken Herzkranzarterie entspringt. Dieses Septumgefäß hat etwa das Kaliber der rechten Koronararterie. Er dringt sofort tief in den vorderen Teil des Septum ein, verläuft parallel abwärts zur Septumvorderfläche und gibt senkrecht kleinere, parallel angeordnete, zur Septummitte ziehende Zweige ab. Das Ventrikelseptum zeichnet sich durch eine überaus dichte Blutversorgung aus.

Der Ramus circumflexus der A. coronaria sinistra verläuft ebenfalls nicht in der Atrioventrikularfurche, sondern zieht in schräger Richtung zur linken Herzhinterwand. Er erreicht hier nicht das Gebiet der posterioren Interventrikularfurche, d.h. ein Ramus interventricularis subsinuosus (entspricht dem R. desc. post.) ist nicht konstant ausgebildet (Abb. 4 b, 4 c, 5).

Die rechte Koronararterie tritt nach kurzem subepikardialem Verlauf in das Myokard ein. Der Ramus circumflexus dexter verläuft ebenfalls nicht im Sulcus coronarius, sondern zieht schräg caudoventralwärts zur hinteren Herzfläche und Herzspitze (Abb. 4 c, 5). Ein eigentlicher Ramus interventricularis subsinuosus (dext. post.) fehlt auch hier. (Abb. 4 a-c, 5).

Weitere Angaben über die feinere arterielle Aufzweigung und die topographische Anordnung machten DAY u. JOHNSON (1958) sowie MYCZKOWSKI (1960).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Konfiguration und Aufteilung der arteriellen Gefäße beim Kaninchen sich erheblich von der des Menschen und der Haustiere unterscheidet. Während



Abb. 4 a. linke Seitenans.



Abb. 4 b. Ventralansicht

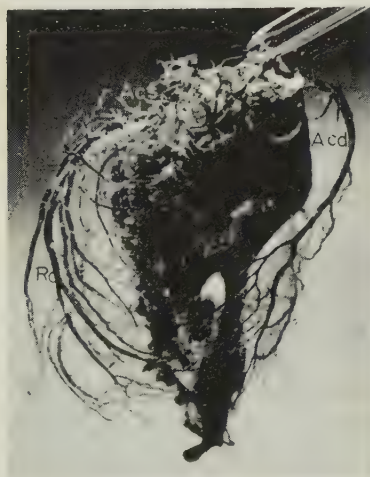


Abb. 4 c. Dorsalansicht

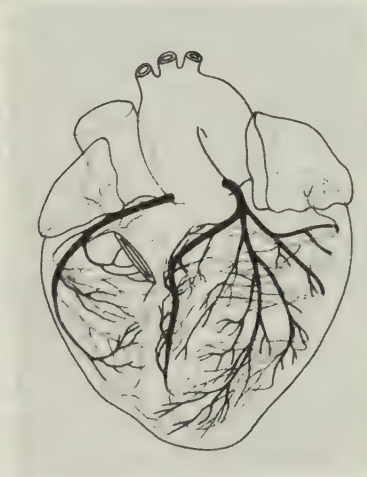


Abb. 5. Schematisierter
Arterienverlauf

Abb. 4 a-c. Arterielle Korrosionspräparate (Plastoid)

A.c.s. Arteria coronaria sinistra - A.c.d. Arteria coronaria dextra - R.s.v. Ramus septi interventr. d. A.c.s. - R.p. Ramus paraconalis d. A.c.s. - R.c. Ramus circumflexus d. A.c.s.

die sternocostale Fläche des Kaninchenherzens eine recht dichte Gefäßversorgung aufweist, ist die Facia post. schütterer vaskularisiert (Abb. 4 c).

Die durch Stauung oder Plastoidinjektion dargestellten Venen weisen in ihrer Topographie große Variationen auf. Nur in wenigen Fällen verlaufen sie - immer subepikardial - parallel zu den Arterien.

Mikroskopische Befunde

Das Muskelgewebe des Herzens besteht aus einem Netzwerk 1. Ordnung. Es ist kein Syncytium; die Disci intercalares stellen echte Zellgrenzen dar. Im Myokard sind die Züge parallel gerichteter Herzmuskelzellen zu größeren Bündeln, den Faszikeln, zusammengefaßt und bilden ein Netzwerk 2. Ordnung. Makroskopisch sichtbare Faszikelbündel der Herzzinnenschichten sind die Trabekel. Die Myoarchitektonik der Herzanteile ist aus der komplizierten Entwicklung ableitbar (BENNINGHOFF, 1930, 1931; BARGMANN u. DOERR, 1963). Das Raumgitter des Herzens durchdringt zartes interstitielles Bindegewebe, das mit dem derbfaserigen subepikardialen Gewebe in Zusammenhang steht.

Beim Kaninchenherzen bestehen die äußeren Längsmuskelschichten nur aus wenigen Muskellagen. Bogenförmig verlaufen Bindegewebsstreifen in die Tiefe der Herzwand. Auf dem gleichen Weg ziehen häufig größere Gefäße.

Die durchschnittliche Breite der Faszikel beträgt am rechten Ventrikelmyokard bis zu 70 μ , dagegen im linken Ventrikel etwa 100 μ . Sie sind durch schmale Muskelbündel untereinander verbunden und dienen nicht selten kleineren Gefäßen als "Brücken", auf denen diese in benachbarte Myokardgebiete eindringen. Der Abstand der Disci intercalares zeigt mit 140 μ im rechten einen deutlichen Unterschied gegenüber 90 - 120 μ im linken Ventrikel. Eine auffallend gestaffelte Anordnung zeigen diese in den Papillarmuskeln. Die Querschnittsdifferenz der einzelnen Herzmuskelzellen des rechten und linken Ventrikels konnten wir auch an unseren Präparaten nachweisen. Nach statistischen Auswertungen von HORT (1953) erreicht die Querschnittsvergrößerung der linksventrikulären Myokardfasern gegenüber dem rechten Ventrikel Differenzwerte bis zu 20 %.

a) Arterien

Die innerhalb der äußeren Längsmuskelschichten bzw. zwischen diesen und den inneren Ringmuskelschichten verlaufenden Haupt-

stämme der Koronararterien verzweigen sich hier rechtwinklig zu den Stromgefäßen. Diese ziehen mit breiten Bindegewebsbegleitstreifen zu den tieferen Muskelschichten. Die von ihnen abzweigenden Äste durchdringen das Myokard ohne Berücksichtigung der Muskelverlaufsrichtung.

Im Septum und der Vorderwand des linken Ventrikels zeigen sie eine parallele Anordnung mit einem Abstand von 250 μ .

Die Weiterverzweigung der Arterienäste erfolgt dann unter mehr oder weniger spitzem Winkel. Wir sahen mehrfach von großen Arterien Seitenäste abgehen, deren Kaliber weniger als 1/5 des Hauptstammes betrug (Abb. 6).

Die intramural verlaufenden Arterien geben retrograd kleine Äste an die unmittelbar unter dem Epikard gelegenen Muskelschichten ab (Abb. 7). Dort verzweigen sich diese Äste vorwiegend zweidimensional, während die Arterien gleichen Kalibers in der Tiefe der inneren Muskelschichten einen ausgesprochenen dreidimensionalen Verteilungscharakter aufweisen.

Sowohl die oberflächlich gelegenen Arterien als auch die Muskeläste zeigen eine stark entwickelte Media und breite Adventitia. Gefäße von "unbestimmtem Charakter", wie sie auch BUCHER (1944, 1945, 1947) beschreibt, fanden wir im Sinusknotenbereich. Sie sind ebenfalls außerordentlich wandstark, wobei aber keine charakteristischen Mediaschichten abgegrenzt werden können. Gefäße mit innerer Längs- und äußerer Ringmuskulatur sahen wir im Septum und linken vorderen Papillarmuskel.

An keiner Stelle unserer Präparate konnten wir arterielle Netzbildungen erster und zweiter Ordnung, wie sie für den Skelettmuskel typisch sind, finden.

Die intramural verlaufenden Arterien- und Venenäste sind wohl an verschiedenen Stellen benachbart, sie liegen jedoch nie in einer gemeinsamen Bindegewebsscheide.

b) Venen

Die ableitenden großen Venen verlaufen vorwiegend subepikardial oder nur von wenigen Muskellagen bedeckt parallel zur Herzoberfläche und zur Muskelfaserrichtung. Die intramyokardial gelegenen venösen Gefäße benutzen die bindegewebigen Zwischenschichten der Muskellagen als Leitstraße. Sie können auf lange Strecken im histologischen Schnittpräparat als platte Bänder verfolgt werden, im Gegensatz zu den mittleren Arterien, die ohne

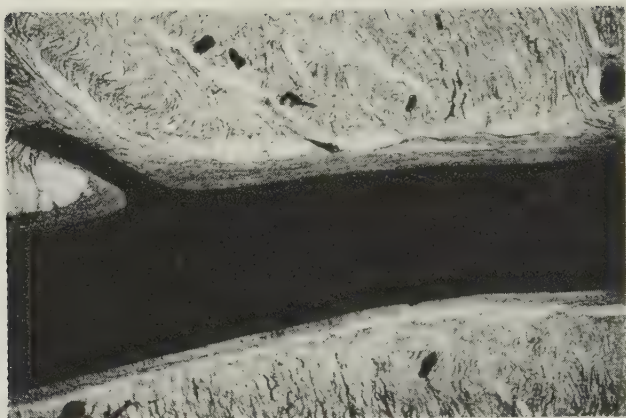


Abb. 6. Kleinkalibriger Seitenast eines arteriellen Hauptgefäßes (Tusche-Inj., Vergr. 80 fach, Schnittdicke 120 μ)

Abb. 7b

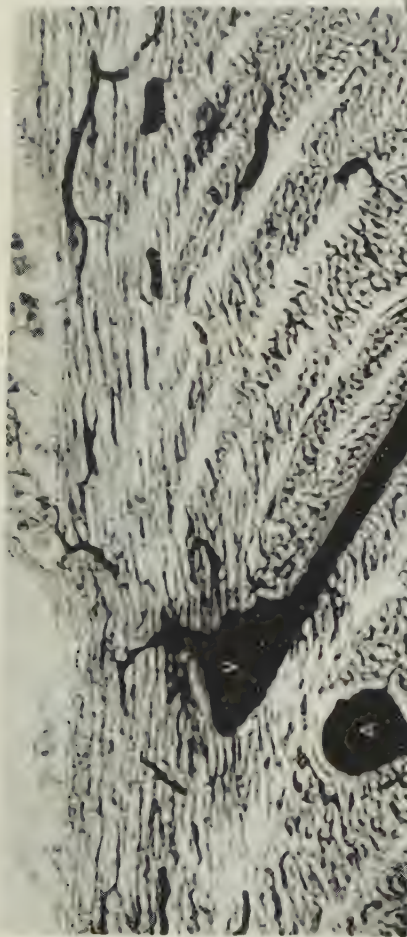
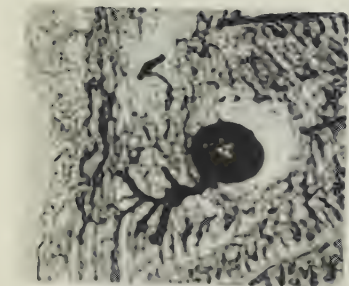


Abb. 7a

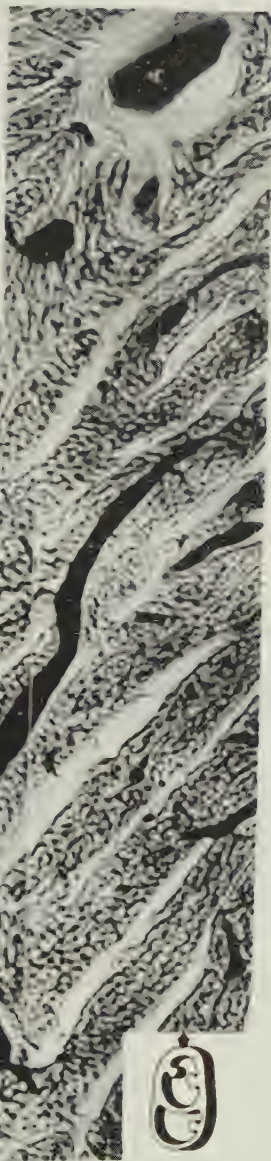


Abb. 7 a. Arterien- u. Venenverlauf im Vergleich zur Muskulanordnung.
Abb. 7 b. Retrograde arterielle Versorgung der epikardialen Schichten.
(Doppel-Inj. mit Carmin- u. Berliner-Blauf-Gelatine; 120 μ Schnittdicke)
Vergr. 120 fach

Rücksicht auf die Muskelverlaufsrichtung das Myokard durchdringen (Abb. 7 u. 43). Mehrere Venenäste vereinigen sich zu einem Stammgefäß; daraus resultiert eine - für die venöse Strombahn typische - sprunghafte Kaliberzunahme. Alle Venen sind auffallend dünnwandig und klappenlos. Die Thebesischen Venen werden im Kapitel der Mikrozirkulation abgehandelt.

c) Lymphgefäße

Vorwiegend im Septum, aber auch in den Ventrikelwänden erstreckt sich ein Netzwerk von Gefäßen unterschiedlichen Kalibers, deren Wand nur mit Endothel ausgekleidet ist. Diese "Endothelrohre" verlaufen oft in unmittelbarer Umgebung der intramuralen Arterien. Da sie sich bei keiner der angewandten Injektionen, auch nicht bei Doppelinjektion, weder von der arteriellen noch venösen Seite her, auffüllen ließen, muß es sich um Lymphgefäße größeren Kalibers handeln. (Abb. 8 u. 9).

d) Venöse Sinus

Endothelausgekleidete, geschlossene Spalträume befinden sich zwischen den Muskelfaserbündeln, insbesondere des Septums und beider Ventrikel. Sie unterscheiden sich von den interfaszikulären Verschiebespalten durch ihre Endothelauskleidung, von den Lymphgefäßen durch ihre spindelförmige Konfiguration.

Arterioluminale Gefäße sowie arteriosinusoidale Gefäße, die WEARN (1928 a, b) und TRUEX u. Mitarb. (1951, 1952) als Besonderheiten des myokardialen Strombettes beschrieben, konnten wir an unseren Präparaten nicht nachweisen.

e) Anastomosen in den makrozirkulatorischen Gefäßabschnitten

An den Korrosionspräparaten finden sich arterio-arterielle Anastomosen an der sternocostalen Fläche des Herzens, vorwiegend über dem Conus arteriosus zwischen Ästen des Ramus interventricularis paraconalis (R. desc. ant.) und Wandästen der A. coronaria dextra. Hierbei handelt es sich um heterocoronare Verbindungen; homocoronare Anastomosen verbinden Äste der A. coronaria dextra vorwiegend im Bereich der rechten Ventrikelvorderwand.

Die Anastomosen im arteriellen Gefäßbereich stellen lediglich kleinkalibrige Verbindungen dar. Dagegen anastomosieren die

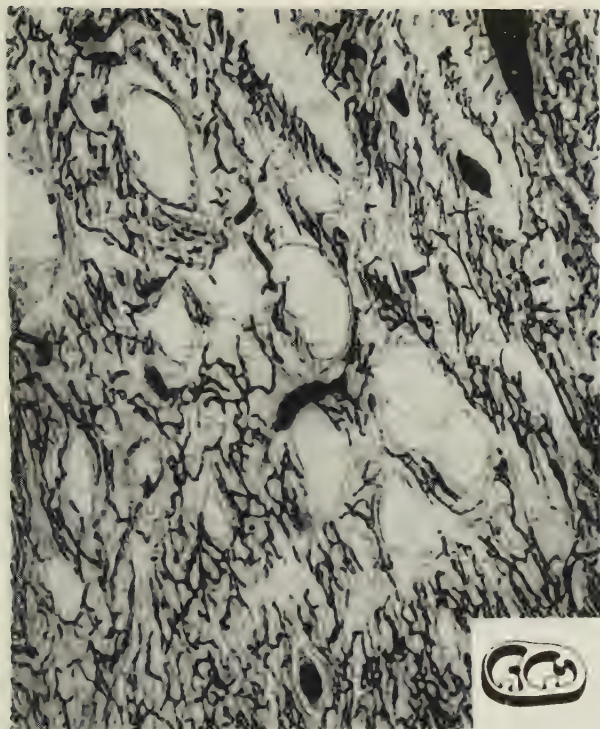


Abb. 8

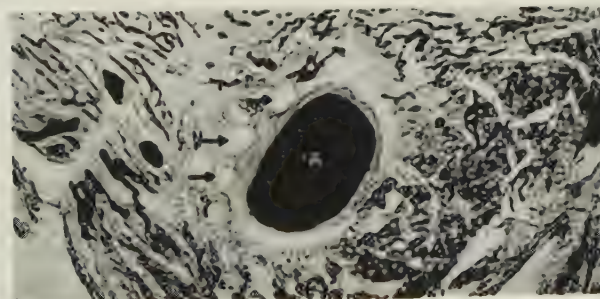


Abb. 9

Abb. 8 u. 9 Großlumige Lymphgefäße. (Doppel-
Inj. mit Carmin u. Berliner-Blau-Gelatine;
80 μ Schnittdicke) Vergr. 160 fach

oberflächlichen und auch tieferen Venen reichlich miteinander. Auch hier wird die sternocostale Fläche des Herzens bevorzugt mit Verbindungen zwischen Zweigen der V. interventricularis paracranialis (V. cordis magna) und den Venae cordis parvae des rechten Ventrikels.

Anastomosen im Bereich der kleineren Gefäße werden im Abschnitt der Mikrozirkulation besprochen.

2. Mikrozirkulatorisches Strombett

Die "terminale Strombahn" oder "Mikrozirkulation" oder als "capillary bed" etwas zu eng gefaßte Bezeichnung wird im allgemeinen gerechnet ab Arteriolen, Praekapillaren, Kapillaren und Postkapillaren bis zu den Venulen. Einige Autoren zählen auch die kleinsten Arterien zu diesem Kreislaufabschnitt. Weitere Unterscheidungen werden getroffen, je nachdem, ob die Untersuchungen aus morphologischer, physiologischer oder pharmakologischer Sicht heraus erfolgen.

Die Einteilung der terminalen Strombahn kann nach folgenden Gesichtspunkten getroffen werden: 1. nach Lebendbeobachtungen (Vitalmikroskopie, in neuerer Zeit auch Endoskopie); 2. nach morphologischer Wandbeschaffenheit; 3. nach dem Gefäßkaliber.

Während die Vitalmikroskopie, deren natürliches Injektionsmittel das Blut selbst darstellt, genaue Einblicke in die Strömungsrichtung der in den oberflächlichen Schichten gelegenen Gefäße erlaubt, vermag sie nichts auszusagen über die Gefäßverhältnisse in tieferen Lagen. Die morphologischen Kriterien richten sich nach der Wandbeschaffenheit. Während die kleinen und kleinsten Arterien noch eine geschlossene zwei- oder einschichtige Muskellage besitzen, wird diese bei den als Arteriolen bezeichneten Gefäßen bereits lückenhaft. Die Endarteriolen bzw. Praekapillaren stellen den Übergang zu den muskelfreien, d.h. nur aus Endothel bestehenden Kapillaren dar.

Die Einteilung nach dem Gefäßkaliber erscheint noch unklarer. Aus den Angaben verschiedener Autoren wurde Tabelle 1 zusammengestellt. Hieraus geht hervor, daß auf Grund von Gefäßkalibermessungen und den sehr differierenden Angaben des Schrifttums kaum Rückschlüsse zu ziehen sind. In der vorliegenden Arbeit haben wir die Einteilung von ILLIG (1961) übernommen.

	kleinste Arterien	Arterien	terminale Arterien bzw. Präkapillaren	Kapillaren	Postkapillaren	Venulen
SAKADE 1939	150-200	bis 40	15-30	8-18		
GIESE 1957			40-50	6-15	50	
ILLIG 1961	80	40-80	15-40			
FAHRAUES zit. n. Illig			350-10			
BROWN 1965		100	15	6-8		50
BETZ 1965		75-10				Angaben in μ m

Tab. 1

Das eigentliche Kapillarbett zeigt in seinem ultramikroskopischen Wandbau, in der Dichte, Anordnung und Länge trotz grundsätzlich gleichbleibender Bauelemente so starke Organspezifität, daß man nicht schlechthin von "Kapillaren", sondern beispielsweise von "Muskelkapillaren" sprechen sollte (BARGMANN, 1955; KISCH, 1957, 1963; MOORE u. RUSKA, 1957; BENNETT u. Mitarb., 1959; RENKIN, 1963). Dazu kommt die unterschiedliche Wertigkeit von Kapillaren und Kapillarabschnitten, die für die Gewebsversorgung von ausschlaggebender Bedeutung ist (MÜLLER, 1937; GIESE, 1957; HAMMERSEN u. STAUBESAND, 1961).

Literaturübersicht der terminalen Myokardstrombahn

Mit diesem Gefäßabschnitt des Myokards, vorwiegend mit dem Verhältnis Kapillaren : Muskelfasern haben sich WEARN (1928 b); LINZBACH (1947 a, 1958); HORT (1955); HORT u. HORT (1958); HECHT (1958); PROVENCA u. SCHERLIS (1959) und BROWN (1965) befaßt.

Auswertung des eigenen Materials

Infolge des komplizierten Muskelgefüges des Myokards und der Dichte des Parenchyms, sowie der photomikroskopischen Darstellungsschwierigkeiten der räumlichen Gefäßanordnung kann häufig nur eine deskriptive Beschreibung der stereomikroskopischen, bzw. eine schematisierte zeichnerische Darstellung der histologischen Bilder gegeben werden. Bei der Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten, die sich durch die dreidimensionale Anordnung ergibt, sind sicher nicht alle funktionellen Besonderheiten erfaßt worden. Es wurden deshalb spezielle Anordnungen, die sich bei der Betrachtung der terminalen Strombahn im Arteriolen-, Venulen- und Kapillarbild öfter wiederholten, herausgegriffen. Bei der Definition der einzelnen Abschnitte der terminalen Strombahn an den Injektionspräparaten fehlt die Möglichkeit der Wandbeurteilung. Als Kapillaren definierten wir die kleinstkalibrigen Gefäßstrecken, deren Innendurchmesser auch bei Teilung und Aufzweigung konstant bleibt, während Arteriolen und Venulen lediglich an ihrer typischen Art der Verzweigung bzw. des Zusammenflusses differenziert werden können. Ihre Charakteristika werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

a) Arteriolen

Als Arteriolen werden solche Gefäßzweige bezeichnet, die einen Innendurchmesser von 40 - 60 μ aufweisen. Sie zweigen im rechten Winkel von den kleinsten Arterien ab, verlaufen vorwiegend in den Bindegewebssepten der Muskelfaszikel und geben wiederum rechtwinklig ihre Zweige ab (Abb. 10, 11, 15); diese dringen entweder sofort in den anliegenden Faszikel ein und verzweigen sich in seiner Tiefe weiter (Abb. 13), oder aber sie überqueren diese Muskellagen, indem sie sie bogenförmig umgreifen (Abb. 14) und laufen in einer anderen Ebene zu weiter entfernten Faszikeln. Von den beschriebenen Arteriolenbögen gehen Seitenäste nach einer der beiden Seiten ab (Abb. 13), die zunächst in Muskelfaserichtung weiterlaufen und sich dann in alle drei Raumrichtungen in ihre Tochterarteriolen und terminalen Arteriolen (Praekapillaren) weiter aufteilen, um dann in das kapilläre Maschenwerk überzugehen. Die Seitenäste übernehmen die Teilversorgung mehrerer Faszikel. (Abb. 10 - 17). Bei der Aufteilung eines arteriolen Seitenastes ist auffallend, daß die jeweils senkrecht zur Muskelfaserichtung verlaufenden Abschnitte sehr kurz sind im Gegensatz zu den faserparallel liegenden Gefäßabschnitten (Abb. 11, 12, 15, 16, 17, 66).

Nur an den dicken (80 - 120 μ) Schnittpräparaten bekommt man ein gesamtes Arteriolenbäumchen vom Abgang seiner "Stammarterie" bis hinab zum Übergang in die Kapillaren ins Blickfeld. Viel häufiger "zerlegt" der Schnitt den Arteriolenverlauf; die angeschnittenen Arteriolenbögen ergeben dann texturartige Bilder.

Der Übergang der terminalen Arteriole in die Kapillare zeigt verschiedene Möglichkeiten:

- a) die Aufteilung der Endarteriole erfolgt nach dichotomem Muster, wobei wiederum die quer zu den einzelnen Muskelfasern gelegenen Strecken auffallend kurz sind. Die zwei, aus einer Endarteriole hervorgehenden Kapillaren können beide in die gleiche Richtung, die eine von ihnen aber auch zur Gegenseite weiterverlaufen (Abb. 18, 19).
- b) eine häufig anzutreffende Form der Endaufzweigung einer terminalen Arteriole stellt das zarte Endarteriolenbäumchen dar,



Abb. 10. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 120 fach



Abb. 11. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

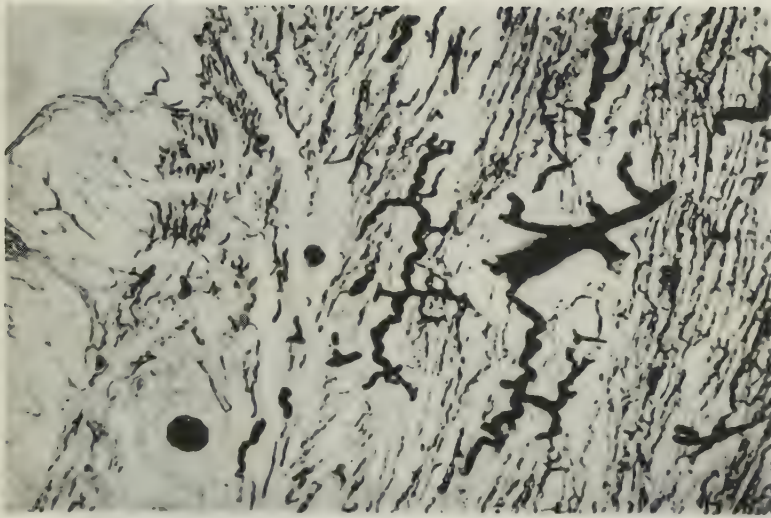


Abb. 12. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 120 fach

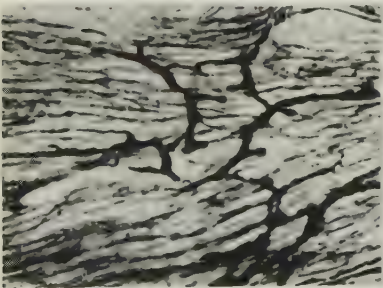


Abb. 13.

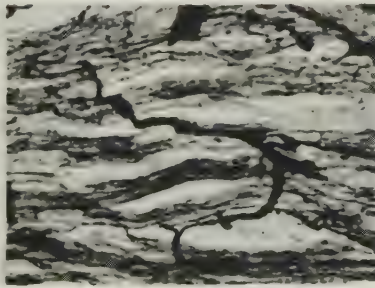


Abb. 14.

(Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 140fach

Abb. 12 - 14 zeigen Arteriolenverlauf und -aufteilung.

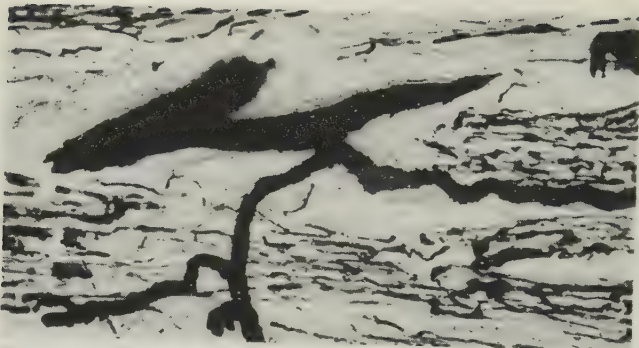


Abb.15

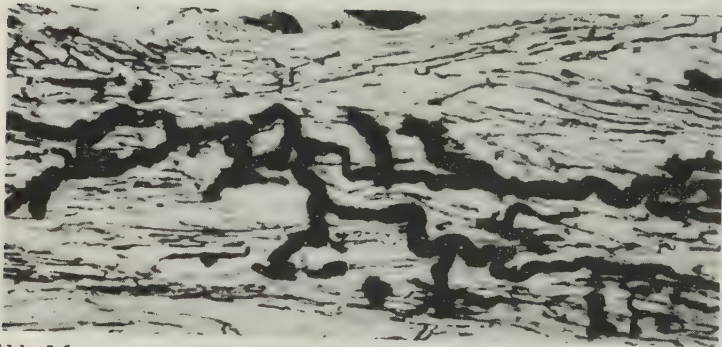


Abb.16

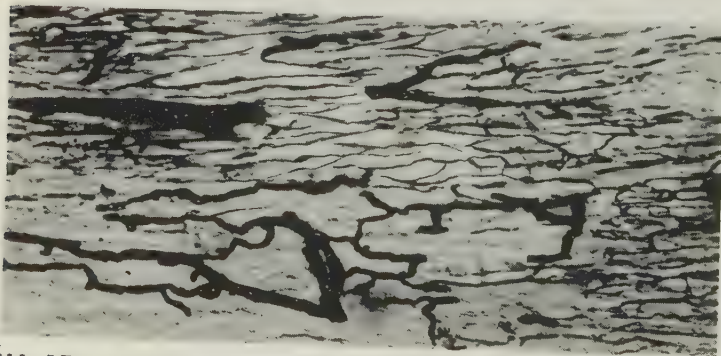


Abb.17

Abb. 14 - 17. "Gebrochener" Verlauf der arteriolen Seitenäste. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnitttdicke) Vergr. 200 fach

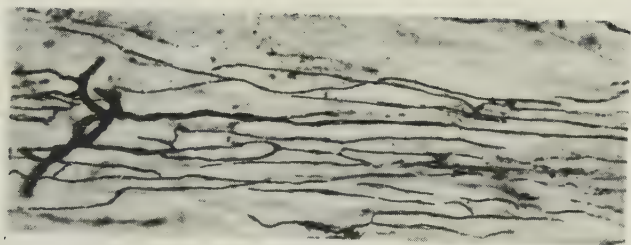


Abb. 18



Abb. 19

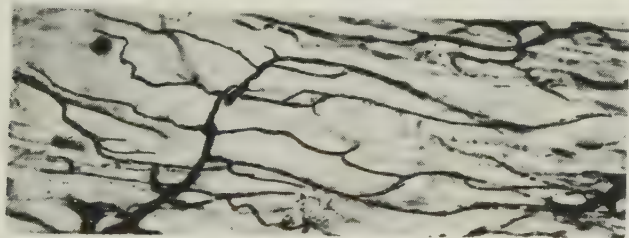


Abb. 20

Abb. 18 - 20. Aufzweigungsmöglichkeiten einer terminalen Arteriolen und Übergang in Kapillaren. (Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

das nach beiden Seiten gleichzeitig seine Kapillaren abgibt. Der Abstand dieser parallel verlaufenden kapillären Seitenäste beträgt dann 40 - 50 μ , d.h. es liegen immer mehrere Muskelfasern zwischen ihnen, die der Kapillarversorgung entbehren. (Abb. 20).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das Bild eines Arteriolenbaumes und seiner feineren Äste vielgestaltig sein kann. Allen Formen aber liegt ein "expansiver" Charakter zugrunde, d.h. die Blutversorgung erfolgt in alle drei Richtungen des Raumes. Gerade diese kurzstämmige Verästelung nach allen Seiten läßt eine Unterscheidung zwischen Arteriolen und Venulen zu. (Abb. 35, 66). Während dieser "Raumfaktor" vor allem in den inneren Muskelschichten der Kompakte deutlich hervortritt, wird er in den dünneren äußeren Längsmuskelschichten mehr ins Flächenhafte abgewandelt, die charakteristische Verzweigung aber beibehalten.

b) Kapillaren

Nach der Einteilung von BENNETT u. Mitarb. (1959) gehören die Muskelkapillaren und wahrscheinlich auch die Herzkapillaren dem Typ A 1 alpha an, d.h. ihr Wandbau besitzt eine vollständig geschlossene Basalmembran, eine geschlossene Endothellage ohne Fensterung oder Poren, aber eine inkomplette Umhüllung mit perivaskulären Zellen zwischen Parenchym und Kapillarwand.

Trotz großer Variationsmöglichkeiten bei der Aufzweigung einer Arteriole ist die häufigste Form die dichotome Teilung einer terminalen Arteriole in ihre zwei Tochterkapillaren (Abb. 19). Während sich das Gefäßkaliber von der Arteriole über ihre Tochterarteriole und weiter zu den Praekapillaren (terminalen Arteriolen) kontinuierlich verringert, behalten die Kapillaren auch bei ihrer Weiterverzweigung bzw. der Bildung eines kapillaren Netzwerkes ihr Kaliber bei. Auf diese Weise konnten auch an unseren Injektionspräparaten, die eine Wandbeurteilung nicht zulassen, die eigentlichen kapillaren Gefäßstrecken gut identifiziert werden.

Der Anfangsteil einer Kapillare (von der Aufteilung einer terminalen Arteriole) und das Kapillarende (an der Einmündung in eine Venule bzw. Postkapillare) kann exakt angegeben werden. Es ist dagegen morphologisch nicht möglich, innerhalb einer Kapil-

larstrecke die Grenze zwischen arteriellem und venösem Schenkel einer Kapillare festzulegen.

Das Myokard zeigt eine ungeheuer dichte Kapillarisierung. Obwohl diese Tatsache bereits am Querschnittspräparat sehr deutlich zutage tritt, vermag erst der faserparallele Längsschnitt über die eigentliche Beziehung der Kapillaren zu den einzelnen Muskelfaserelementen Auskunft zu geben. Bei grober Betrachtung unserer Längsschnittpräparate scheint sich das Kapillarmuster nach der vorgegebenen parallelen Muskelfaseranordnung zu richten: die meisten Kapillaren verlaufen zunächst faserparallel und bilden ein Netzwerk aus elongierten Maschen (Abb. 21, 29 - 32). Jede Kapillare ist auf ihrem Parallelverlauf gewöhnlich mit den benachbarten mehrfach durch rechtwinklig zur Faserrichtung verlaufende interkapilläre Queranastomosen verbunden, deren Abstand voneinander völlig irregulär ist. Auch stehen sie in keiner Beziehung zu den Disci intercalares. Andererseits gibt es aber auch Kapillaren, die auf eine Länge von mehr als 500 μ keine Queranastomosen zeigen. Außer diesen Verbindungen, die jeweils nur eine Muskelfaser überspringen, sahen wir, zwar seltener, Queranastomosen kapillären Charakters, die sich zu weiter entfernten Kapillaren erstrecken.

Die Formen und Einteilung dieser interkapillären Verbindungen werden in einem späteren Abschnitt behandelt.

Das Bild der Kapillaranordnung erscheint also auf den ersten Blick recht monoton. Erst bei näherer Analyse, vor allem in ihrer räumlichen Anordnung, ergeben sich eine Fülle von Einzelfaktoren im Hinblick auf Aufzweigung, Form und Verlauf, deren funktionelle Deutung zunächst noch offenbleiben muß.

Auch hier können in der Beschreibung nur einige immer wiederkehrende Bau- und Formprinzipien herausgegriffen werden, die sich von dem Prototyp der Muskelkapillaranordnung, den faserparallelen, elongierten Maschen mit ihren einfachen Querverbindungen unterscheiden. Einige Kapillaren biegen z. B. unter Bildung einer haarnadelförmigen Kurve abrupt um und nehmen einen ihrer ursprünglichen Strömungsrichtung entgegengesetzten Verlauf. Dabei laufen sie in der gleichen Ebene zurück, oder aber sie tauchen in eine andere Schicht unter. (Abb. 23, 24, 25, 26, 27, 39, 48).

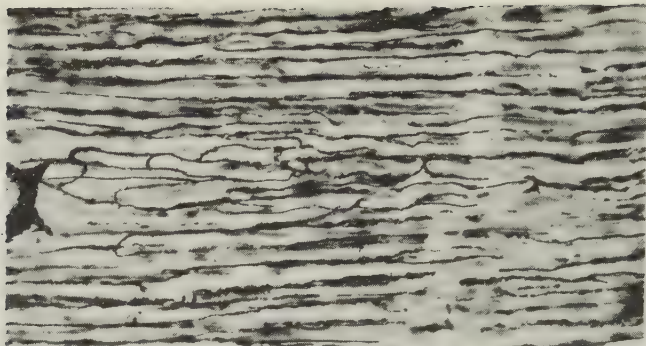


Abb. 21. (Vergr. 250 fach)

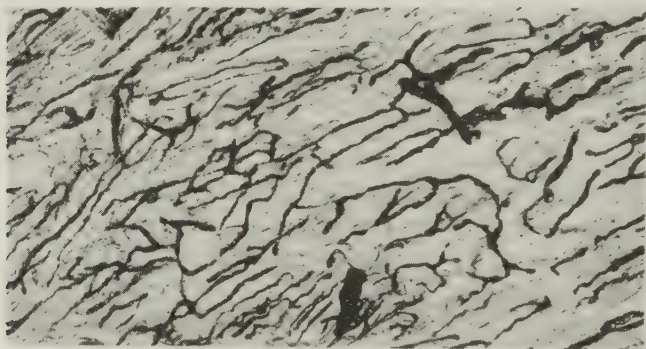


Abb. 22. (Vergr. 200 fach)

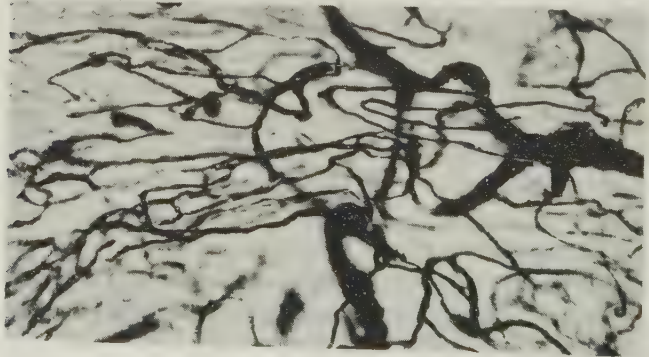


Abb. 23. (Vergr. 120 fach)

Abb. 21 - 23. Differente Kapillarmuster in topographisch verschiedenen Myokardbezirken. (Tusche-Inj.; Schnittdicke 80 μ)

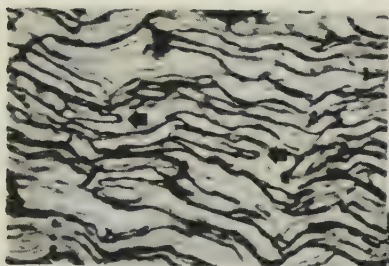


Abb. 24

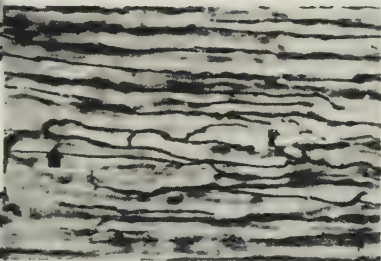


Abb. 25



Abb. 26

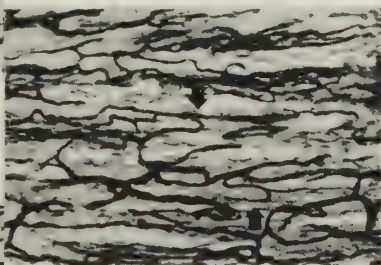


Abb. 27

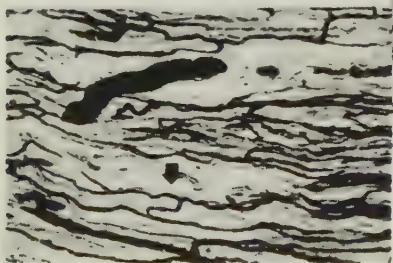


Abb. 28

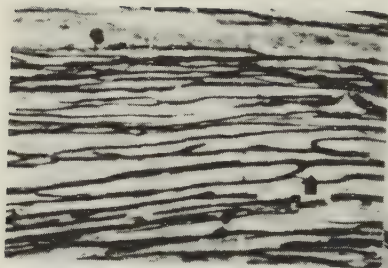


Abb. 29

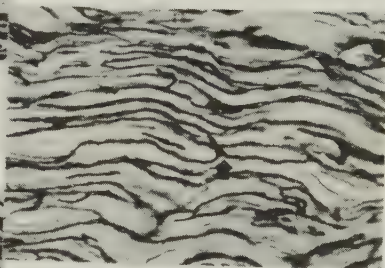


Abb. 30

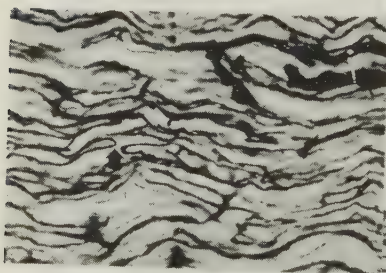


Abb. 31

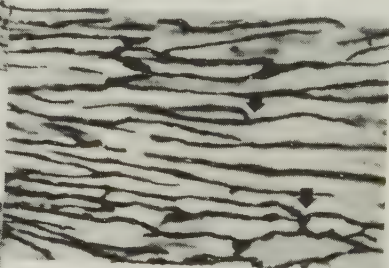


Abb. 32

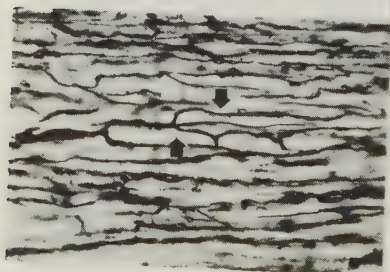


Abb. 33

Abb. 24 - 33. Verschiedene Kapillarmuster und Sonderformen.
(Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 250 fach

An mehreren Stellen sahen wir zwei dieser "Haarnadelkapillaren" mit ihrer Konvexität gegenüberliegen (Abb. 31). Andere Kapillaren wiederum verlaufen S-förmig, d.h. sie biegen zweimal von ihrer ursprünglichen Richtung ab (Abb. 27, 28). Durch das Übergehen der Kapillaren in eine andere Schicht ergaben sich in der ursprünglichen Projektionsebene oft völlig irreführende Bilder, die erst beim Nachmikrometrieren ihre wahre Form zeigen. Weiterhin unterschieden werden müssen solche Kapillarverzweigungen, die zunächst interkapilläre Anastomosen darzustellen scheinen. Der Quersteg stellt lediglich eine kurze, senkrecht zur Muskelfaser liegende ungeteilte Kapillarstrecke dar, von der aus sich die beiden Seitenzweige nach entgegengesetzten Richtungen wieder längs der Muskelfasern anordnen, d.h. die Richtung des Blutstromes erfolgt nach beiden Seiten (Abb. 29, 30, 32). Das wiederum muß in einem Schenkel der geteilten Kapillare zu einer entgegengesetzten Strömungsrichtung bei Vergleich mit einer ungeteilten, parallelverlaufenden Nachbarkapillare zur Folge haben. (Abb. 24 - 32).

Wie in den Arbeiten von WEARN (1928 b); HORT (1955); LINZBACH (1947 a, b) und HECHT (1958) über die Anordnung der Kapillaren - gewonnen am Querschnittpräparat - betont wird, gehört zu einer Muskelfaser gewöhnlich eine Kapillare. Nach unserer Beobachtung am Längsschnitt und bei stereoskopischer Betrachtung der 80 μ dicken, aufgehellten Injektionspräparate, ist es nicht immer dieselbe Kapillare, die eine Muskelfaser auf ihrer Gesamtlänge versorgt, sondern es treten verschiedene Kapillaren an eine Myokardfaser heran, um nach kürzerer oder längerer Strecke eine andere Verlaufsrichtung einzuschlagen oder in eine andere Ebene zu ziehen. Dabei kann eine Kapillare die Teilversorgung einer anderen Faser übernehmen, oder aber sie umgreift bogenförmig die ursprüngliche Muskelfaser und tritt in einer anderen Ebene wieder an sie heran. Dabei wiederum kann sie die alte Verlaufsrichtung beibehalten oder zur Gegenseite ziehen. Das würde bedeuten, daß die einzelne Myokardfaser auf ihrem Verlauf nicht auf einige oder wenige Kapillaren angewiesen ist, sondern daß sie auf ihrer Gesamtstrecke mit Blut, in weitester Auslegung sogar von verschiedenen arteriellen Zustromgebieten in Berührung kommt. Die stark schematisierte Zeichnung (Abb. 34) gibt die Möglichkeiten der räumlichen Kapillaranordnung um die Myokardfasern wieder.



Abb. 34. Schema der Kapillaranordnung, das Verhalten zu den Myokardfasern und interkapilläre Verbindungen.

Eine auf optimale Gewebsversorgung ausgerichtete Gefäßanordnung wird besonders deutlich am venösen Schenkel des kapillaren Netzwerkes. Bevor sich die Kapillaren und Postkapillaren zu einer Vene formieren, werden die longitudinalen Maschen kürzer und die Querverbindungen häufiger (Abb. 35, 40, 42). Dadurch wirkt die gesamte Kapillaranordnung dichter. Im Gegensatz zu den arteriellen Aufteilungen stoßen die Kapillaren am venösen Schenkel vorwiegend im spitzen Winkel zusammen (Abb. 35). An der Grenze zu gefäßlosen Gebieten bilden die Kapillaren Schlingen, die ihre Konvexität der kapillarfreien Zone zuwenden (Abb. 36). In den Bindegewebszwickeln der Gefäße sowie im subepikardialen Fettgewebe geht die "Ausrichtung" der Kapillarmaschen verloren. Sie nehmen hier eine mehr polygonale Form an (Abb. 37, 38). Dieses polygonale Muster finden wir ebenfalls an Stellen, wo die Muskelbündel eine andere Verlaufsrichtung einschlagen, sowie in den Zwickeln der myokardialen Trabekel. Bei denjenigen Herzabschnitten, deren Kapillarnetz ein gleichmäßiges Bild bietet (z.B. Papillarmuskel), findet man die parallel angeordneten Maschen gegenüber der nächst höheren bzw. tieferen Schicht um eine halbe Maschenbreite versetzt. Besonders gut sichtbar wird diese Versetzung, wenn eine längs verlaufende Kapillare über oder unter einer sog. Haarnadelkapillare verläuft (Abb. 39).

Topographische Besonderheiten des kapillaren Maschenwerkes werden im Rahmen der Beschreibung der einzelnen Herzabschnitte abgehandelt.

c) Venulen

Ein ganz anderes Bild bieten die sammelnden Venulen. Sie zeichnen sich aus durch auffallend kurze postkapillare Strecken, einen büschelförmigen Zusammenfluß der Kapillaren, die aus verschiedenen Richtungen zu den Venulenhämmchen ziehen. Diese Art des kapillären Zusammenflusses hat ihnen die Bezeichnung "Rübenwurzel" (turnip-root) eingebracht, die BROWN (1965) bei allen seinen untersuchten Tierspezies fand (Abb. 40, 41, 42, 74). Während sich das Gefäßkaliber im arteriellen Bereich der terminalen Strombahn, also der Übergang von Arteriolen über die Praekapillaren in ihre Tochterkapillaren kontinuierlich mit steter Kaliberabnahme vollzieht, bilden die venösen Kapillarschenkel bei ihrem Zusammenfluß

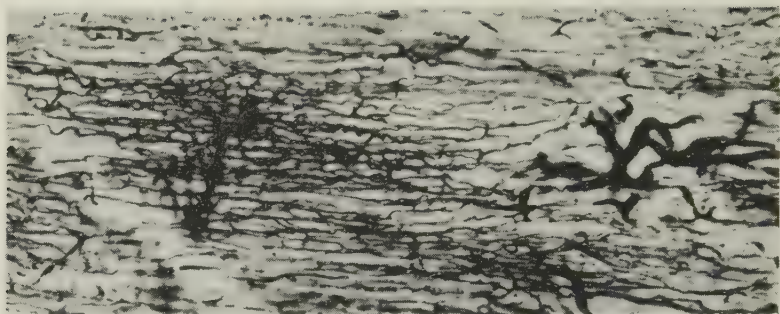


Abb. 35. Postarteriolar und prävenuläres Kapillarnetz:
das Maschenwerk am venösen Kapillarschenkel ist auffallend
dicht. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

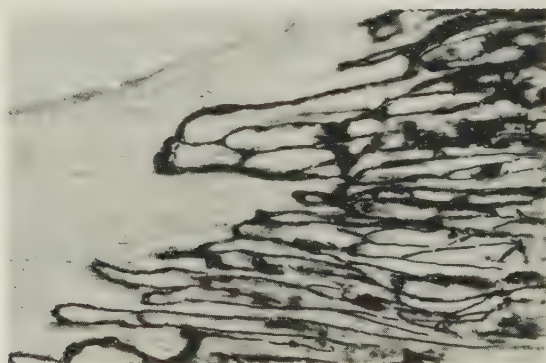


Abb. 36. Schlingenbildung der Kapillaren am Übergang des
muskulären zum sehnigen Anteil des Papillarmuskels.
(Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 300 fach

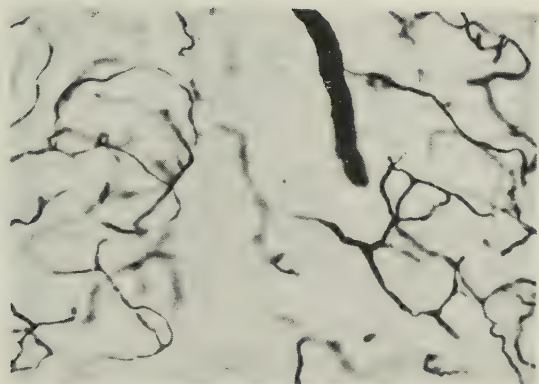


Abb. 37.
Kapillarmaschen im
epikardialen Fettgewe-
be. (Tusche-Inj.;
100 μ Schnittdicke)
Vergr. 200 fach

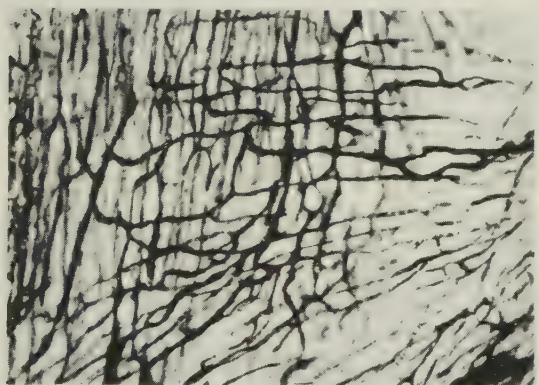


Abb. 38.
Kreuzende Muskelschich-
ten mit ihren Kapilla-
ren. (Tusche-Inj.;
100 μ Schnittdicke)
Vergr. 200 fach

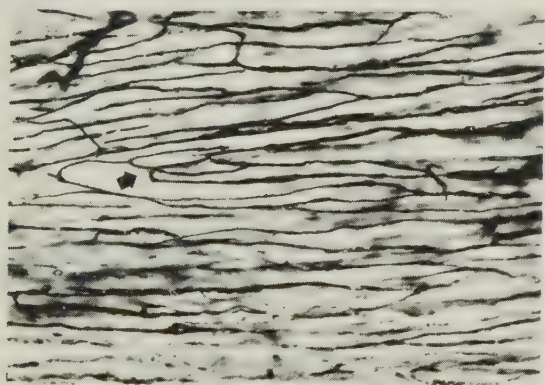


Abb. 39.
Versetzung der Kapil-
larmaschen um eine
halbe Muskelfaserbrei-
te. (Tusche-Inj.; 60 μ
Schnittdicke)
Vergr. 250 fach

sofort ein relativ dickes Venulenhämmchen mit einem Durchmesser nicht selten von 50 μ . Die Venulen erhalten ihren Zufluß meist aus mehr als einem arteriellen Stromgebiet, oft sogar aus weit entfernten Arteriolenbäumchen (Abb. 40, 41, 42). Die Venule verläuft zunächst in Muskelfaserrichtung weiter, biegt dann aber oft abrupt ab und kreuzt die Mykardfasern, um auf schnellstem Wege in die entsprechende Faszikelvene einzumünden. Diese kleineren "Kollektorvenen" verlaufen ebenfalls zunächst parallel zu der Muskelfaserrichtung weiter und münden in die interfaszikulär liegenden größeren Venenäste ein, die man dann als bandartige Schatten auf eine große Strecke verfolgen kann (Abb. 43). Daraus muß man annehmen, daß sich die Venen flächenhaft in Richtung auf das Epikard hin ihren Weg bahnen und dabei die Muskelschichten bzw. das zwischen ihnen gelegene Bindegewebe als Leitstraße benutzen - im Gegensatz zu den mittleren Arterien, die sich ohne Rücksicht auf den Muskelverlauf in expansiver Weise in alle drei Raumrichtungen verzweigen.

d) Thebesische Venen

In den subendokardialen Schichten sahen wir an mehreren Stellen kleinkalibrige Venen parallel zur inneren Oberfläche verlaufen. In diese Gefäße münden rechtwinklig kurze Venulen ein, deren Kapillarzufuß aus den angrenzenden myokardialen Schichten stammt. Die Venen ziehen weiter zu den intertrabekulären Spalten, d.h. sie geben ihr Blut durch das trabekuläre Schwammwerk direkt in die Herzhöhlen ab. Diese Venen wurden sowohl in der rechten als auch in der linken Ventrikelinnenwand, vorwiegend aber am Septum und an der Basis der Papillarmuskeln beobachtet. Ihre typische Lage, Verlauf sowie ihre luminale Mündung erlauben, sie als thebesische Gefäße zu bezeichnen. (Abb. 44, 45).

e) Besonderheiten zwischen Arteriolen und Venulen

Die Unterscheidung der Arteriolen und Venulen ist auf Grund der oben geschilderten Charakteristika auch ohne Doppelinjektion relativ leicht. Bei gegenüberstellender Beurteilung dieser beiden Gefäßabschnitte an Übersichtsmikrophotogrammen ergaben sich weitere wesentliche Unterschiede: 1. Die unterschiedliche Kapillar-



Abb. 40. Arteriolenbaum mit rarefiziertem Kapillarmuster dicht neben einer Venule mit dicht liegenden Kapillaren. Überlappung der Versorgungsgebiete. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke)
Vergr. 120 fach



Abb. 41. "Rübenwurzelvene". Mehrere kurzstämmige Venulen münden in eine großkalibrige Kollektorvene. (Doppel-Inj. mit Carmin u. Berliner-Blau-Gelatine; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 120 fach

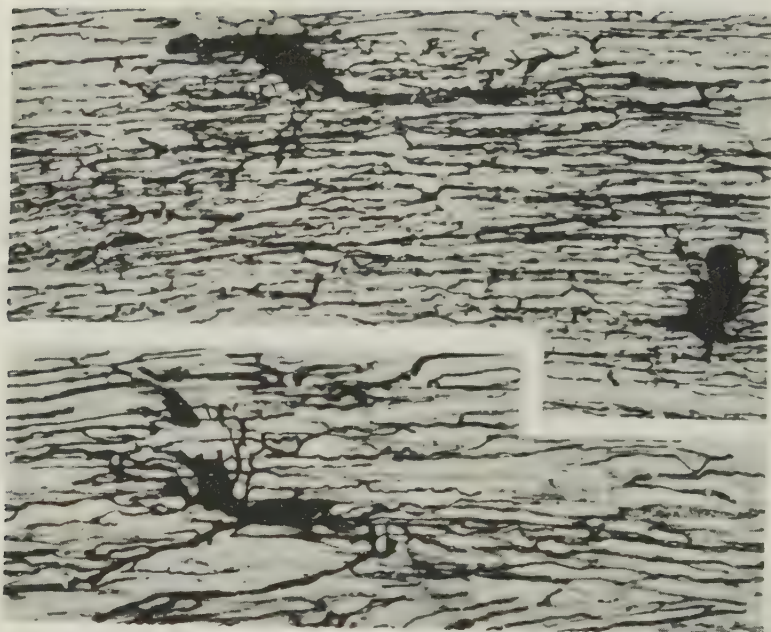


Abb. 42. "Rübenwurzelvenen". (Tusche-Inj.; 80 μ Schnitt-
dicke) Vergr. 200 fach

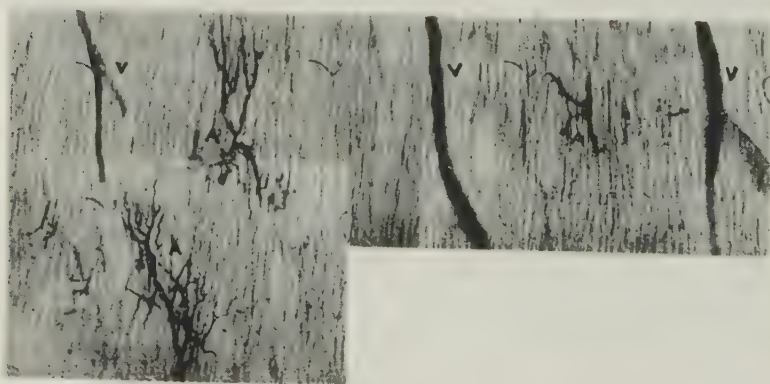


Abb. 43. Muskelfaserparallel und vorwiegend zwischen den
einzelnen Muskellagen verlaufende größere Venen; daneben
Arteriolenbäumchen. Kapillaren nicht gefüllt. (Doppel-Inj.
mit Carmin u. Berliner-Blau-Gelatine; 120 μ Schnittdicke)
Vergr. 80 fach

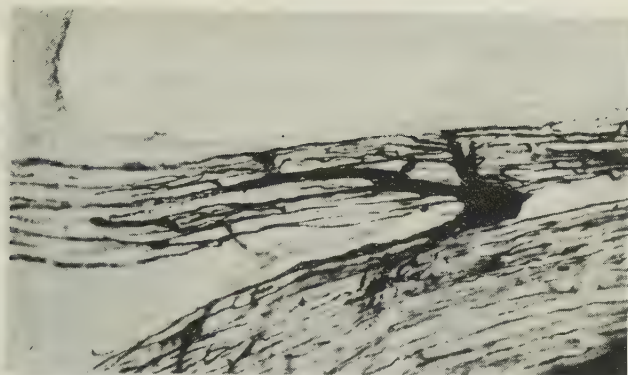


Abb. 44 (Vergr. 150 fach)



Abb. 45 (Vergr. 120 fach)

Abb. 44 u. 45. "Thebesische Venen". Ihr Zuflußgebiet stammt aus den inneren bzw. subendokardialen Myokardschichten. Sie münden in die intertrabekulären Spalten bzw. direkt in die Herzhöhlen. (Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke)

dicke des postarteriellen und praevenulären kapillaren Maschenwerkes wurde bereits früher abgehandelt (Abb. 35, 40, 41).

2. In unmittelbarer Umgebung der Arteriolen fanden wir oft kapillarfrie Bezirke. Das spricht für eine bereits durch die Gefäßwand stattfindende O_2 -Diffusion, die eine Kapillarisierung entbehrlich macht. Ähnliches berichten HORT (1955) und BETZ (1966). 3. Die alternierende Lage von Arteriolen und Venulen mit ihren unterschiedlichen Kapillarmaschen. Auf diese Weise kommen kapillardichte Bezirke neben Stellen mit schütterer Kapillarisierung zu liegen (Abb. 46). Zunächst lag es nahe, an eine unvollständige Kapillarinjektion zu denken; die nähere Betrachtung zeigte jedoch an keiner Stelle Füllungsdefekte (Abb. 46).

4. An die senkrecht zur Muskelfaserrichtung verlaufenden Arteriolenbögen treten gehäuft Kapillarschleifen heran, die zum venösen Stromgebiet zurücklaufen. Sie sind jeweils mit ihren Scheiteln zu den Arteriolen hin gerichtet. (Abb. 47, 48, 49). Auf die funktionelle Bedeutung dieser Kapillarschlingen wird im Diskussionsabschnitt näher eingegangen werden. 5. Wie bereits früher erwähnt, scheinen die Arteriolen- und Venulenhäufchen einer mehr oder weniger strengen Verteilung im Raum unterworfen zu sein. Dieses dreidimensionale "Raumgitter" findet sich vorwiegend in den intramuralen Abschnitten des Myokards. In den weniger dicken inneren und äußeren Längsmuskelschichten erfolgt die Verteilung mehr flächenhaft, sodaß Arteriolen und Venulen alternierend nebeneinander liegen. Sie unterliegt aber an keiner Stelle des Myokards einem starren Prinzip.

f) Anastomosen

Das Auffinden von Anastomosen im Bereich der mikrozirkulatorischen Strombahn ist an Schnittpräparaten selbst bei großer Schnittdicke problematisch. Noch schwieriger ist ihre photographische Dokumentation. Eine quantitative Angabe entfällt damit, da nur solche Gefäßverbindungen gewertet werden können, die sich in einer Bildebene befinden. - Arterio-venuläre Anastomosen sahen wir nur an wenigen Stellen unserer Präparate (Abb. 50). Dagegen sind Anastomosen zwischen Arteriolen häufiger. Wir sahen diese Verbindungen in beiden Ventrikeln und im Septum, vorwiegend aber in den subepikardialen Schichten (Abb. 51). Anastomosen im

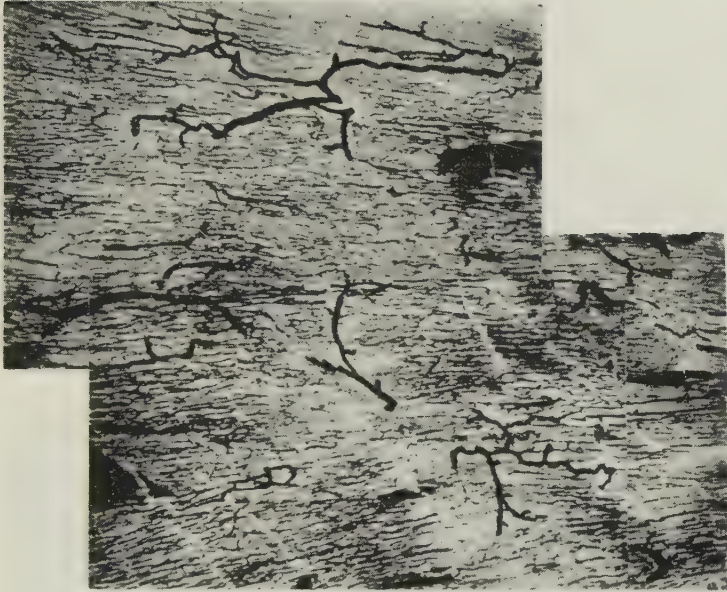


Abb. 46. Alternierende Lage von Arteriolen und Venulen, die im stereoskopischen Bild eine Versetzung gegeneinander zeigen; daraus resultiert ein "Raumgitterprinzip" zwischen den beiden Gefäßarten. (Doppel-Inj. mit Carmin-Berliner-Blau-Gelatine; 120 μ Schnittdicke) Vergr. 70 fach

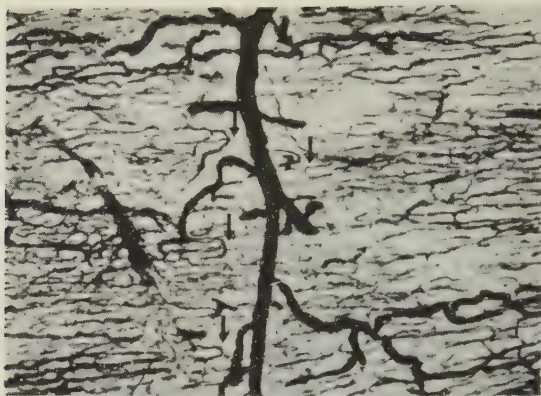


Abb. 47.
100 μ Schnittdicke;
Vergr. 120 fach

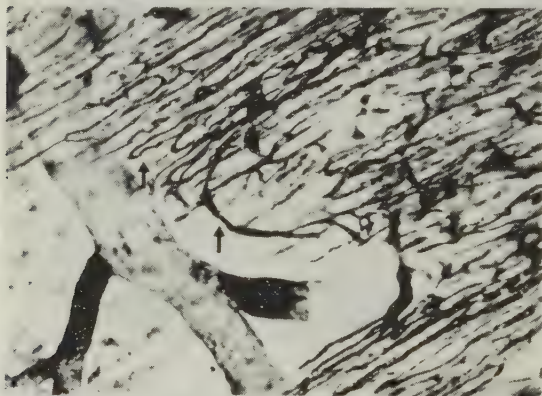


Abb. 48.
120 μ Schnittdicke;
Vergr. 150 fach

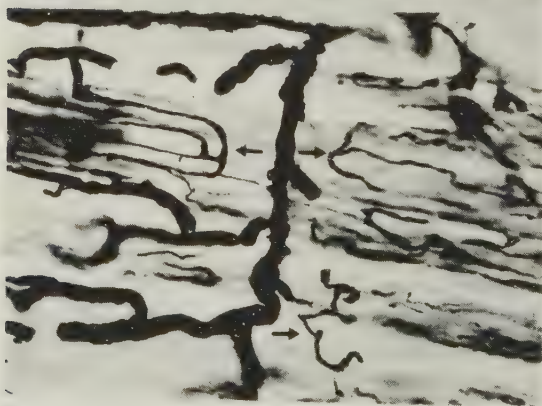


Abb. 49.
80 μ Schnittdicke;
Vergr. 250 fach

Abb. 47 - 49. Venöse Kapillarschleifen, die an arterielle Gefäße herantreten. (Tusche-Inj.)

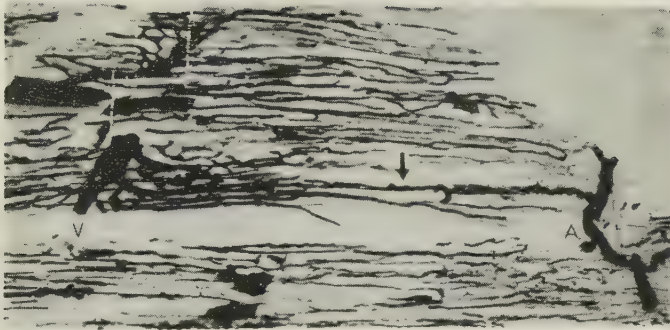


Abb. 50. Arteriolar-venuläre Anastomose.
(Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 160 fach

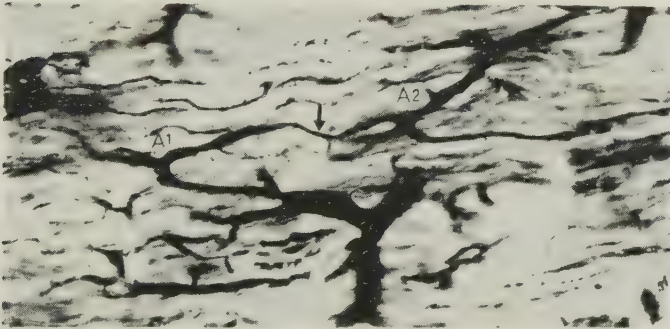


Abb. 51. Anastomose zwischen zwei Arteriolen.
(Carmin-Gelatine-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 250 fach

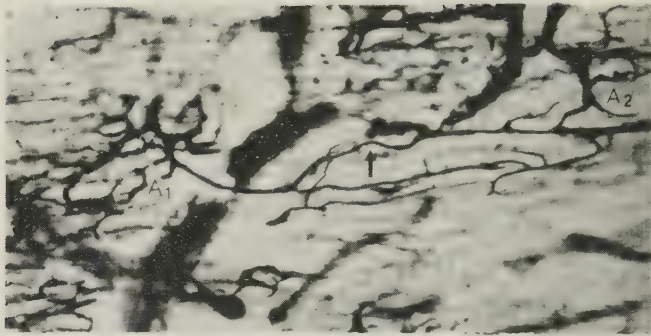


Abb. 52. Präkapillare Anastomosen. (Doppelinj. mit Carmin-Berliner-Blau-Gelatine; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 160 fach

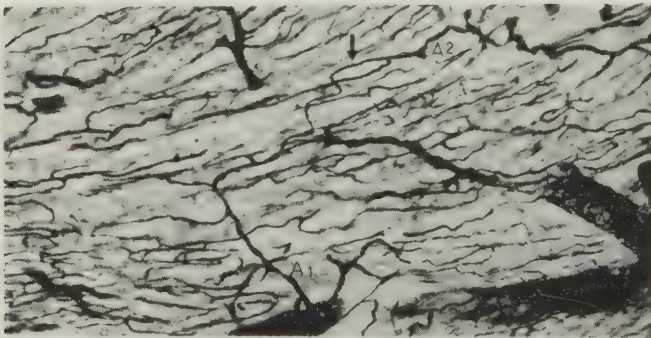


Abb. 53. Kapilläre Anastomosierung zweier terminaler Arteriolen. (Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

praekapillaren Bereich sind häufig, ihrer Lokalisation nach sowohl im linken als auch im rechten Ventrikel anzutreffen (Abb. 52, 53).

g) Interkapilläre Anastomosen

Bei der Durchmusterung der histologischen Präparate fallen sofort die kurzen Querverbindungen auf, die senkrecht von einer Kapillare zur benachbarten ziehen, indem sie eine Muskelfaser mit einer durchschnittlichen Breite von $10\ \mu$ überspringen (Typ I) (Abb. 54, 55). Sie treten besonders häufig im Kapillarbett der Ventrikel, seltener dagegen in den Papillarmuskeln auf. Der Abstand von einer solchen Querverbindung zur nächsten ist völlig irregulär, sie liegen oft relativ benachbart, während bis zur nächsten Verbindung auf der gleichen Parallelstrecke ein großer Abstand besteht. Wieweit in der zweiten und dritten Dimension eine Regularität vorliegt, läßt sich nicht mit Sicherheit beweisen; denn sowohl auf der Mikrophotographie als auch bei direkter mikroskopischer Betrachtung sieht man stummelförmige Kapillarabgänge; sie stellen wahrscheinlich die senkrecht zur nächsten Schicht abgehenden interkapillären Anastomosen dar. Die zur Schnittebene parallelen, aber in tieferen Schichten gelegenen Anastomosen schimmern schemenhaft durch. Diese Anastomosen zwischen zwei benachbarten Kapillaren sind häufiger kurz vor Zusammenfluß zu einer Venule, d.h. also zwischen den venösen Kapillarabschnitten. (Abb. 35, 42). Neben diesen Verbindungen zwischen zwei benachbarten Kapillaren fallen weitere Querstege kapillaren Charakters auf, die ebenfalls senkrecht abzweigen, sich aber über zwei oder drei, (Typ II) (Abb. 55, 56), in vereinzelten Fällen sogar über sechs bis acht Muskelfasern hinweg erstrecken (Typ III) (Abb. 57, 58, 59) und so Verbindung mit entfernt liegenden Kapillaren herstellen. Sie sind jedoch viel seltener als der erstgenannte Typ. Auch über faszikuläre Spalträume sahen wir Verbindungen kapillaren Charakters hinwegziehen (Abb. 60, 61). BROWN (1965), der diese Kapillaranastomosen ebenfalls an allen untersuchten Tierspezies fand, teilte sie in drei Typen: Zu Typ I rechnet er Anastomosen zwischen zwei Tochterkapillaren einer Endarteriole, zu Typ II solche, die Kapillaren verschiedener terminaler Arteriolen verbinden. Typ III stellen Kapillarverbindungen dar, die von weiter entfernt liegenden Arteriolenzweigen stammen.

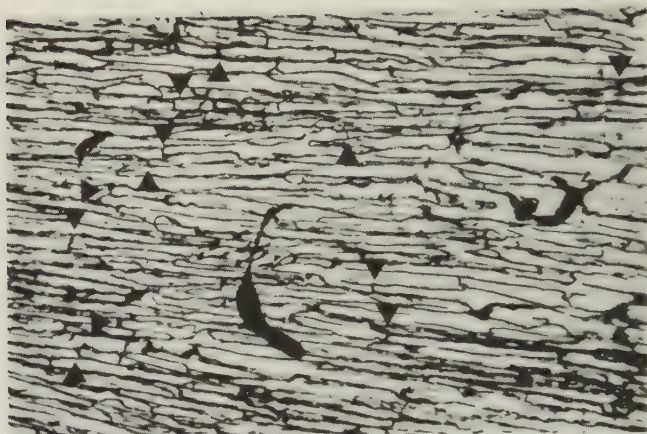


Abb. 54. (Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 160 fach

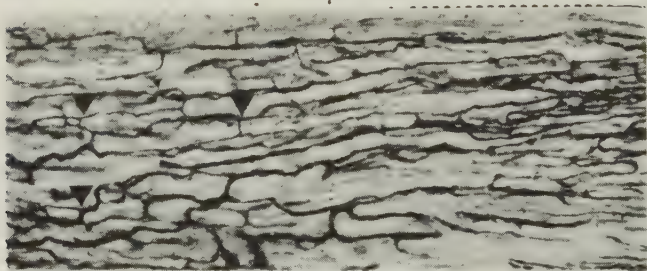


Abb. 55. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 300 fach

Abb. 54 u. 55. Interkapilläre Anastomosen vom Typ I

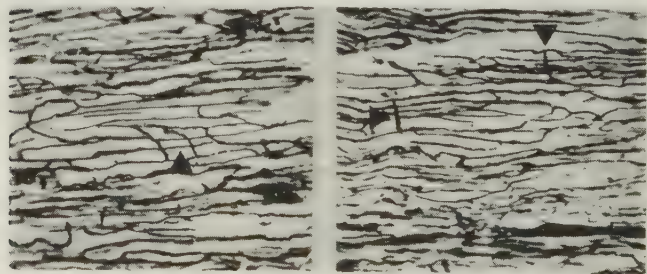


Abb. 56. Interkapilläre Anastomosen vom Typ II
(Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 160 fach

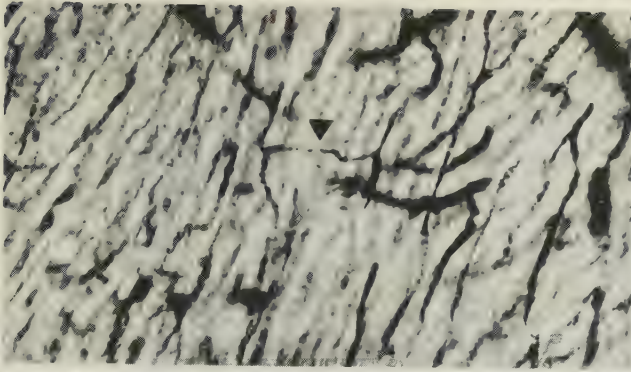


Abb. 57. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 500 fach



Abb. 58. (Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

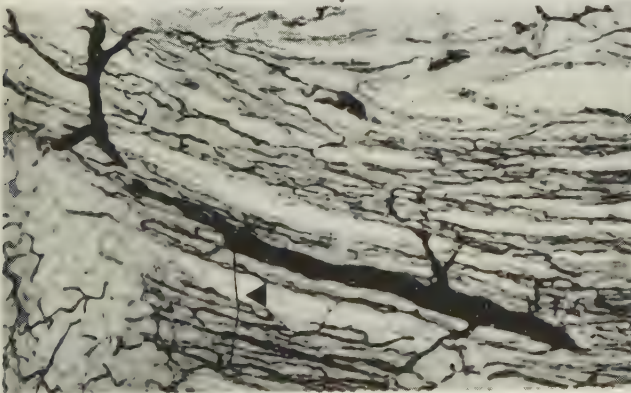


Abb. 59. (Tusche-Inj.; 80 μ Schnittdicke) Vergr. 160 fach

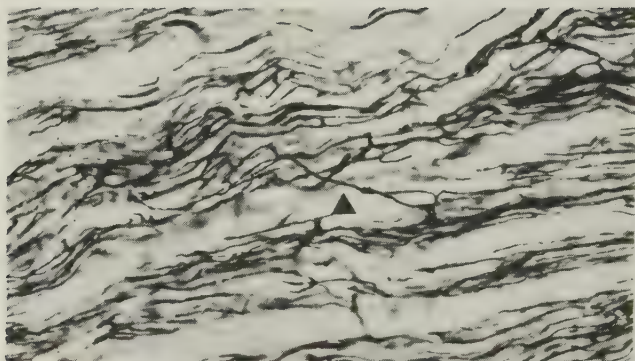


Abb. 60. (Tusche-Inj.; 120 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

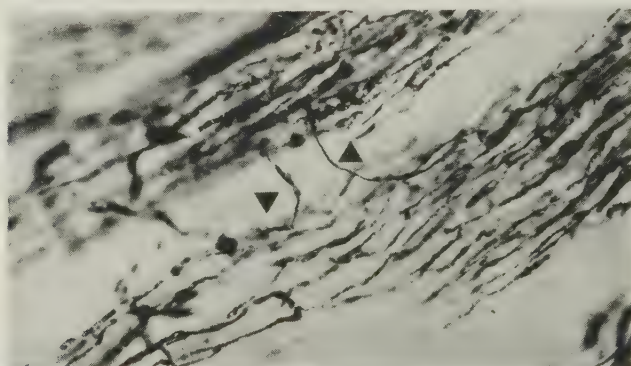


Abb. 61. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 300 fach

Abb. 57 - 61. Interkapilläre Anastomosen vom Typ III.

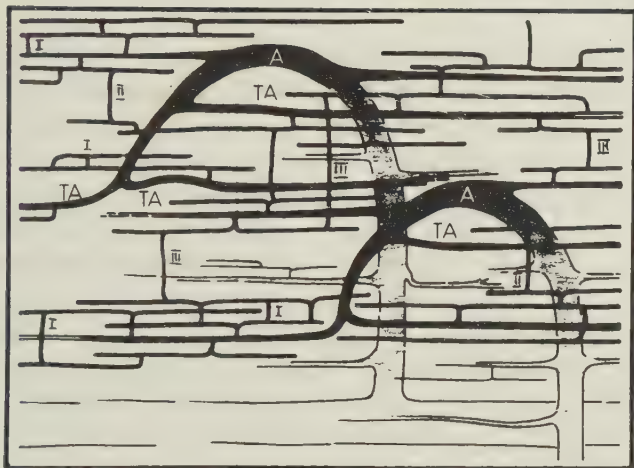


Abb. 62. Schematische Darstellung der interkapil-
lären Verbindungsmöglichkeiten.
A Arteriole - TA terminale Arteriole - I, II, III
Kapillaranastomosentypen.

Unser Anastomosenschema (Abb. 62) zeigt die Verbindungsmöglichkeiten der Kapillaren aus den einzelnen arteriolen Ursprungsgebieten.

h) Kapillarlängen

Die Berechnung der effektiven Kapillarlänge, ohne Berücksichtigung der Vernetzung der Kapillaren untereinander, ist aus der Entfernung von terminaler Arteriole bis zur Postkapillare zu berechnen. Sie kann beim Myokard infolge der ausgeprägten dreidimensionalen Verzweigung des Arteriolenbaumes, der Überlappung der Versorgungsgebiete und der oft ungünstigen Schnittführung nur zu Annäherungswerten führen. Sowohl die Entfernung Arteriole-Venule als auch die Kapillarteilstrecken, d.h. die Strecken von einer Verzweigung zur nächsten innerhalb des kapillaren Maschenwerkes zwischen den Stammgefäßen, streuen in hohem Maße. An unseren Präparaten fanden wir arteriolar-venuläre Distanzen mit Minimalwerten von 200 μ , und Maximalwerte von unverzweigten Kapillaren von 500 bis 800 μ Länge. Tabelle 2 gibt Kapillarlängen an topographisch verschiedenen Stellen des Myokards an.

i) Histochemische Untersuchung der Myokardkapillaren

Die alkalische Phosphatase-Reaktion nach GOMORI (1939), (Ca-Kobalt-Methode) sowie die ATPase-Reaktion nach PADYKULA u. HERMAN (1955), (Calcium-Methode bei pH 9,4) wurde an 40 μ dicken Kryostatsschnitten von frisch gewonnenem Herzmaterial durchgeführt. Die alkalische Phosphatase zeigte bei Inkubationszeiten von 40 bis 90 min eine starke Reaktion der Kapillaren und Arteriolen. Die großen Gefäße und Venen verhalten sich negativ. Auffallenderweise zeigten die Krümmungen der sog. "Haarnadelkapillaren" eine intensivere Reaktion.

Eine Unterscheidung von venösem und arteriellem Kapillarschenkel, wie sie KLINGMÜLLER (1958) an Hautkapillaren und LANG u. Mitarb. (1966) an Pleurakapillaren beschrieben, konnten wir an unseren Präparaten mit der erforderlichen Sicherheit nicht nachweisen, obwohl an mehreren Stellen folgende Konstellation auftritt: Es liegen stark positive Kapillarabschnitte unmittelbar neben Strecken, die einen schwächeren Reaktionsausfall zeigen.

Die ATPase-Reaktion zeigte auch bei kurzen Inkubationszeiten von 10 bis 15 min eine positive Darstellung der Muskelzellen. Die Zellkerne werden von einer perinukleären Aufhellungszone umgeben. Eine positive Reaktion ergab ebenfalls die Media der großen Gefäße. Eine Reaktionsabschwächung trat im Bereich der Arteriolen ein, während die Kapillaren erst bei längeren Inkubationszeiten deutlich zur Darstellung kamen. Die Venenwände zeigten keine Reaktion.

3. Topographische Besonderheiten der Mikrozirkulation

a) Subepikardiale Schichten

Wie bereits im Abschnitt über die Lage und den Gefäßverlauf der Arterien beschrieben wurde, geben die großen intramural gelegenen Gefäße kleine Zweige zu den subepikardialen Schichten ab (Abb. 7). Die Weiterverzweigung erfolgt hier vorwiegend flächenhaft. Die Art der Aufteilung ist durch die schmale Schale der äußeren Längsmuskelschicht bedingt. Dabei kommt es zu einer alternierenden Lage der kleinen Venen und Arterien, besonders gut sichtbar am Doppelinjektionspräparat mit Berliner-Blau-Carmin-Gelatine. Die Entfernung von terminaler Arteriole zu Venule beträgt an den subepikardialen Schichten des linken Ventrikels im Durchschnitt 400 μ . Sie ist im Vergleich zu den intramuralen Schichten, deren arteriolär-venuläre Entfernung zwischen 280 und 380 μ liegt, größer, aber geringer bei Vergleich mit der subendokardialen Entfernung, die 500 μ vielfach überschreitet.

Verbindungen kapillaren Charakters zwischen den Arteriolen und Venulen dürften am ehesten den "Bügelkapillaren" von HAMMERSEN (1964) entsprechen, die er am Skelettmuskel beschrieb. Desgleichen sind Anastomosen zwischen Arteriolen und Venulen bzw. Praekapillaren und Postkapillaren häufiger in den subepikardialen Muskelschichten zu finden als an anderen Herzabschnitten.

b) Subendokardiale Schichten des Myokards

In ihrem muskulären Bau unterscheiden sich die subendokardialen Schichten kaum von den subepikardialen: beide bestehen nur aus wenigen Muskellagen. Das Gefäßbild beider Schichten dagegen ist sehr verschieden: während die subepikardialen Herzschichten von

großkalibrigen Gefäßen durchzogen werden, gelangt das Blut zu den subendokardialen Muskellagen nur über feine arterioläre Äste, die weit entfernten arteriellen Zustromgebieten entstammen (Abb. 63). Die Kapillaren beherrschen also das Bild; auch sie zeigen lokale Unterschiede ihres Maschenwerkes. Wir fanden sowohl subendokardiale Herzabschnitte, an welchen die Kapillaren dicht parallel zur inneren Oberfläche verliefen (Ausflußbahnen) (Abb. 64), als auch Stellen mit breiter Endokardschicht und darunterliegenden größeren Kapillarnetzen (Trabekelwerk). (Abb. 65). Der Abstand von Arteriolen und Venulen, also die effektive Kapillarlänge zeigt in den subendokardialen Schichten höhere Werte als intramural und subepikardial. So wurden sowohl im rechten als auch im linken Ventrikel und Septum Durchschnittswerte für die subendokardialen Kapillarlängen von etwa 500 μ gemessen. Auch sind in diesen Schichten die interkapillären Anastomosen geringer.

c) Intramurale Schichten

Linker Ventrikel

Das links-ventrikuläre Myokard ist überaus reich vaskularisiert. Besonders die Arteriolenbäumchen stehen dichter als in anderen Herzabschnitten (Abb. 66). Auffallend dicht ist auch das kapillare Maschenwerk. Die mittlere Entfernung von Arteriole zu Venule beträgt durchschnittlich 200 - 380 μ , d.h. die effektive Kapillarlänge ist kleiner als im rechten Ventrikel und den Papillarmuskeln (Tab. 2). Interkapilläre Anastomosen vom Typ I sind häufiger, desgleichen diejenigen kapillaren Verlaufs- und Verzweigungsformen, bei denen eine Gegenströmung bei benachbart liegenden Kapillaren resultiert. Desgleichen können die als "Haarnadelkapillaren" beschriebenen Formen in allen Schichten des linksventrikulären Myokards nachgewiesen werden (Abb. 67). In den Trabekeln fanden wir Gefäße venösen Charakters, die lumenwärts ziehen. Es handelt sich hierbei um die bereits beschriebenen Thebesischen Venen.

Papillarmuskel

Ein ganz anderes Bild bieten die Papillarmuskel. Die großen Gefäße verlaufen parallel zur Längsachse des Muskels. Die senkrecht zum Muskelfaserverlauf abzweigenden Arteriolen gehen in ein geradezu monoton aussehendes, faserparalleles Kapillarmuster

	subepicardial	intramural	subendocardial
linker Ventrikel	400 * 380 - 460	300 * 200 - 380	500
Papillarmuskel (li.V.)			600 - 800
rechter Ventrikel	400 * 350 - 480	400 * 320 - 540	500
Septum interventrik.			500 * 360 - 680

Angaben in my

* gemessene Maximal- bzw. Minimalwerte

Tab. 2

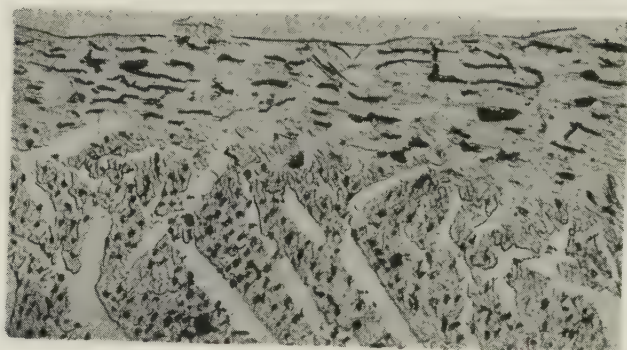


Abb. 63. Gefäßbild der subendokardialen Myokardschichten: fast ausschließlich kapilläre Versorgung. Lockeres Kapillarmuster in den unmittelbar unter dem Endokard gelegenen Herzabschnitten. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

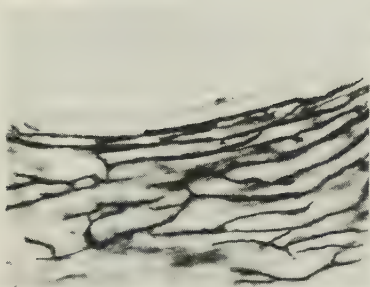


Abb. 64
Ausflußbahn

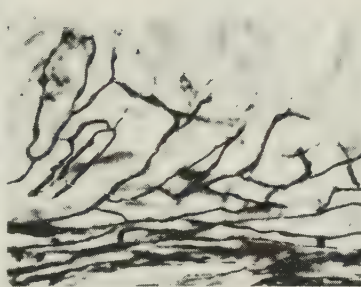


Abb. 65
Trabekel

Subendokardiale Kapillarbilder
(Tusche-Inj.; 80 μ Schnitttdicke)
Vergr. 300 fach

über (Abb. 68, 70). Die interkapillären Anastomosen sind spärlich; die Gesamtlänge der Kapillaren schwankt zwischen 600 und 800 μ . Im Gegensatz zu den subendokardialen Schichten der Ventrikelwandungen verlaufen die Kapillaren der Papillarmuskel überall bis dicht an die endokardiale Oberfläche (Abb. 69), obwohl gerade bei der allseitigen Umspülung der Papillarmuskel mit Blut die transendokardiale Diffusion wirksam werden müßte und dadurch die dichte Kapillarisation entbehrlich werden könnte. Während an den Fußpunkten der Papillarmuskeln die Arteriolenbäumchen dicht angeordnet sind, nimmt ihre Zahl apikal stark ab (Abb. 68, 69, 70). Der venöse Abstrom in den Papillarmuskeln erfolgt fast ausschließlich durch lumenwärts ziehende Thebesische Venen. Am Übergang vom muskulären in den sehnigen, gefäßlosen Teil der Papillarmuskeln biegen die Kapillaren arkadenförmig um und bilden große, weite Maschen (Abb. 36).

Septum

Wie im Kapitel der Makroangioarchitektonik bereits erwähnt, wird das Septum interventriculare von einem starken Ast der Arteria coronaria sinistra versorgt (Abb. 4a). Auch im Bereich der Mikrozirkulation spiegelt sich die ausgiebige Blutversorgung wider: sowohl Arteriolen als auch Venulen sind dicht angeordnet (Abb. 7). Besonders auffällig ist die starke Lymphdrainage des Septums. Diese relativ weitlumigen Endothelrohre liegen vorwiegend periarteriell (Abb. 8 u. 9). Von den venösen Sinus, die im Septum ebenfalls gehäuft vorkommen, unterscheiden sie sich durch ihr Kaliber und das runde Lumen. Die Sinus stellen, je nach Schnittführung, ovale, nur endothel ausgekleidete oder spindelförmige, interfazikuläre Spalträume dar (Abb. 72). Ihr größter Breiten-durchmesser beträgt nicht selten 100 μ . Aus dem komplizierten Muskelaufbau resultiert ein irreguläres Kapillarmuster (Abb. 71 - 73). Auch hier begegnen wir im Trabekelwerk den sog. Thebesischen Venen.

Rechter Ventrikel

In seinem allgemeinen Gefäßmuster unterscheidet sich der rechte Ventrikel nur wenig von dem linksventrikulären Myokard. Die Arteriolen stehen nicht so dicht. Dagegen beträgt die Zahl der Venulen und kleinen Venen ein Vielfaches der Arteriolen (Abb. 74).

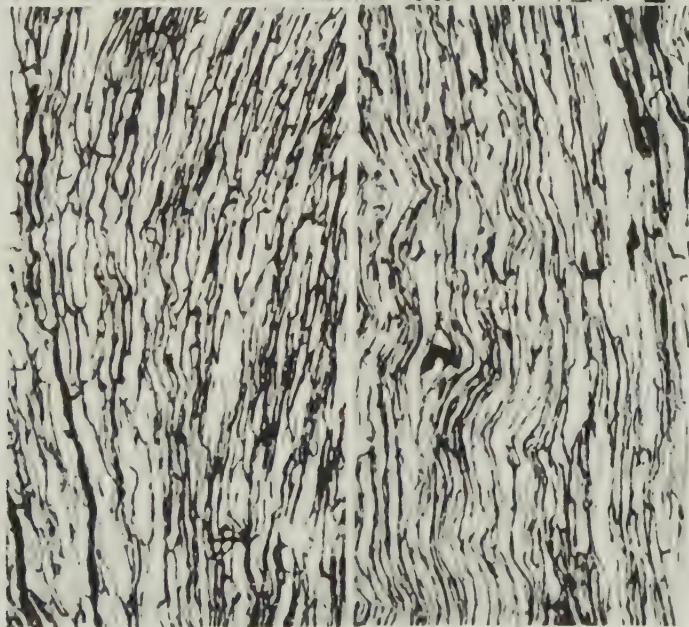


Abb. 67. Enges, kurzmaschiges Kapillarmuster (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach



Abb. 66. Dichte arterielläre Durchdringung der intramuralen Schichten (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 140 fach

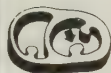
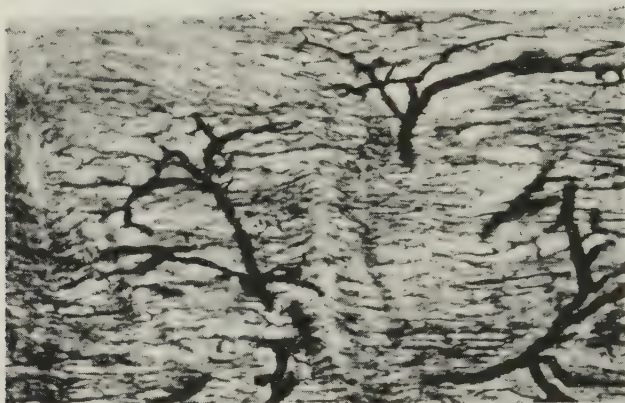


Abb. 68. Dichtstehende Arteriolen an der Basis der Papillarmuskeln; apikal nimmt die Zahl ab. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnitttdicke) Vergr. 140 fach

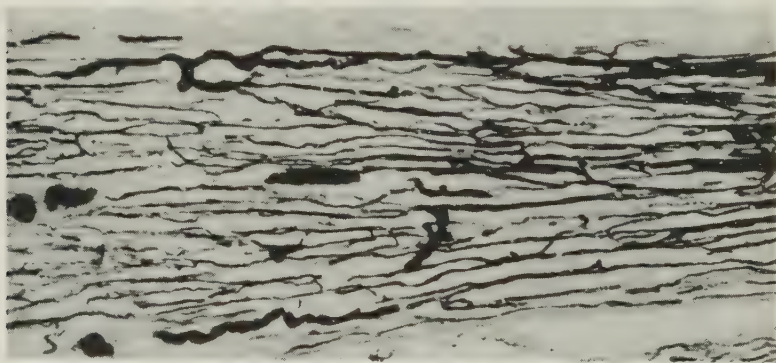


Abb. 69. Kapillarmuster des Papillarmuskels, unmittelbar unter dem Endokard. (Tusche-Inj.; 100 μ Schnitttdicke) Vergr. 200f.



Abb. 70. Kapillarmuster der Papillarmuskelinnenschicht (Tusche-Inj.; 100 μ Schnitttdicke) Vergr. 200 fach

Die Kapillarlängen betragen im Mittel $370\ \mu$, daneben kommen aber auch ungeteilte Kapillaren mit einer Länge von $500\ \mu$ vor. Interkapilläre Anastomosen sind spärlicher (Abb. 75).

d) Vorhöfe und Aurikel

Die Wand der Vorhöfe und Herzohren besteht nur aus wenigen Muskellagen. Sie enthält reichlich Bindegewebe mit elastischen und kollagenen Fasern. Beide Vorhöfe lassen z. T. die konsequente und streng ausgerichtete Muskelanordnung vermissen und bieten ein aufgelockertes Bild. Die Kapillarisierung ist spärlicher, die Maschen sind weiter und irregulärer, die Kapillarteilstrecken groß. (Abb. 76, 77).

e) Reizleitungssystem

Sinusknoten

Das histologische Bild des Sinusknotens mit seinen kurzen, stark verzweigten, fibrillenarmen Fasern macht einen eigenartig zerrissenen Eindruck. Zwischen den Sinusknotenfasern liegt reichlich kollagenes Bindegewebe und vereinzelt Fettzellen. Das Kapillarmuster unterscheidet sich deutlich von dem der übrigen Vorhofsmuskulatur: es ist weitaus schütterer, grobmaschiger, oft polygonal. (Abb. 78, 79). Besonders auffallend sind die sonst an keiner Stelle des Herzens so gehäuft vorkommenden, über weite Strecken hinwegziehenden kapillären Querverbindungen vom Typ III (Abb. 59).

Das Reizleitungssystem des Ventrikelmyokards

An unserem Material fanden wir subendokardial oft bindegewebsumhüllte Muskelfaserbündel, deren Einzelfaserquerschnitte größer waren als die der benachbarten Muskelzellen; die kapilläre Umspinnung ist geringer. Die Glykogenfärbung nach McMANUS (1946) ergab keine eindeutigen Befunde, um diese Myokardfasern als RLS-Fasern zu definieren.

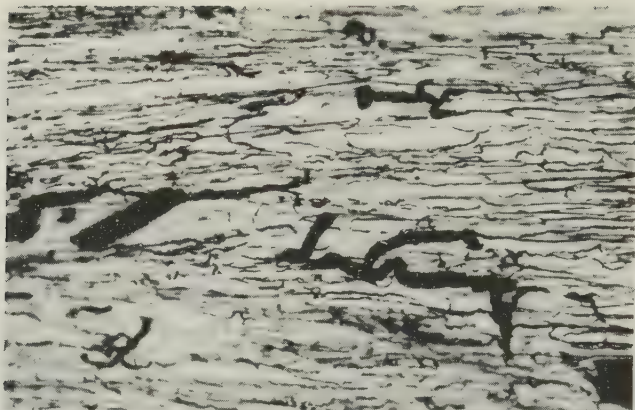


Abb. 71. Terminale Strombahn des Septum interventriculare (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 140 fach

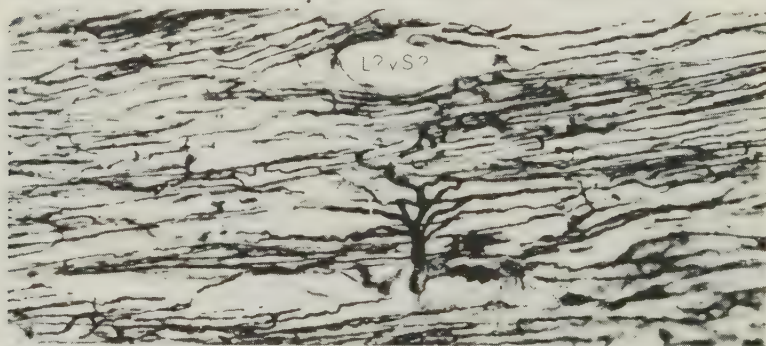


Abb. 72. (Vergr. 200 fach)

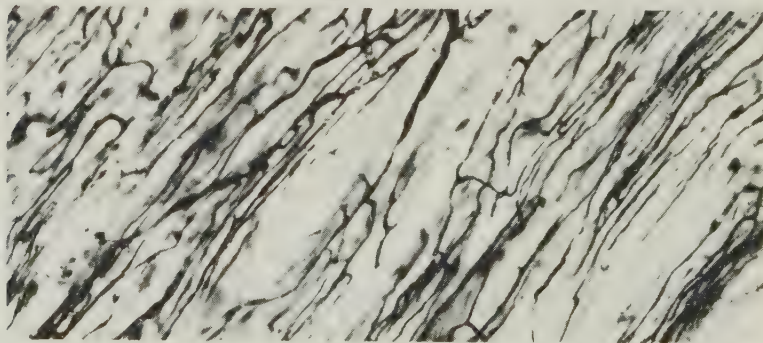


Abb. 73. (Vergr. 250 fach)

Abb. 72 u. 73. Unterschiedliche Kapillarmuster (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke). L? v.S? Lymphgefäß oder querschnittener venöser Sinus?



Abb. 74. Prädominante venöse Drainage des rechtsventrikulären Myokards(Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr.140 fach

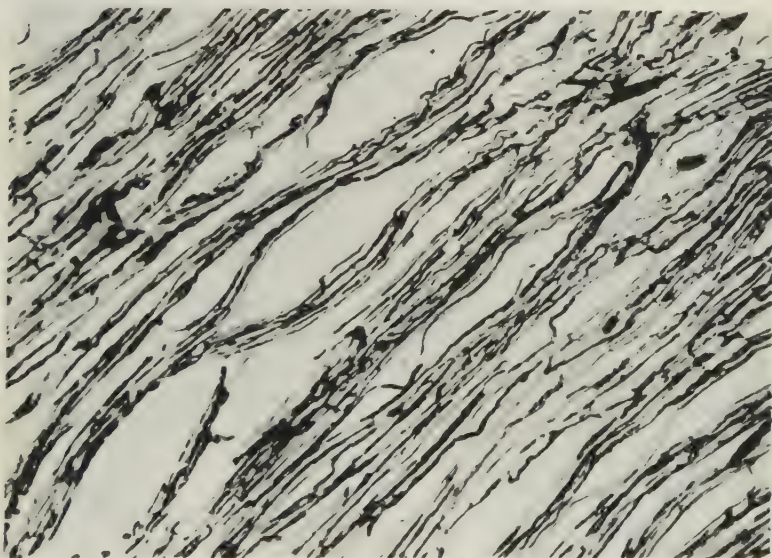


Abb. 75. Schmale Muskelfaszikel; längere Kapillaren, wenig interkapilläre Anastomosen(Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke (Vergr. 200 fach)

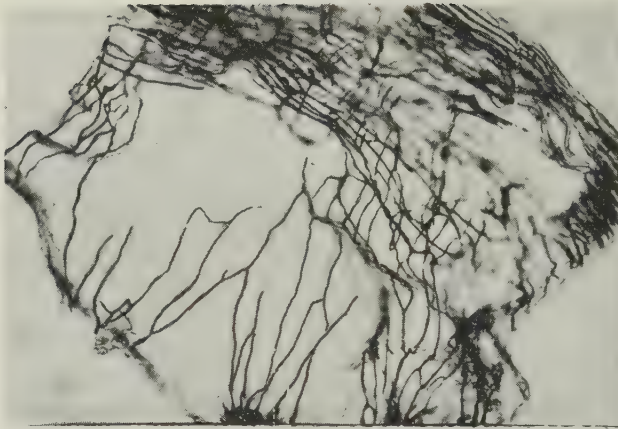


Abb. 76. Weitmaschiges Kapillarmuster (Tusche-Inj.; 150 μ Schnittdicke) Vergr. 140 fach

Vorhöfe

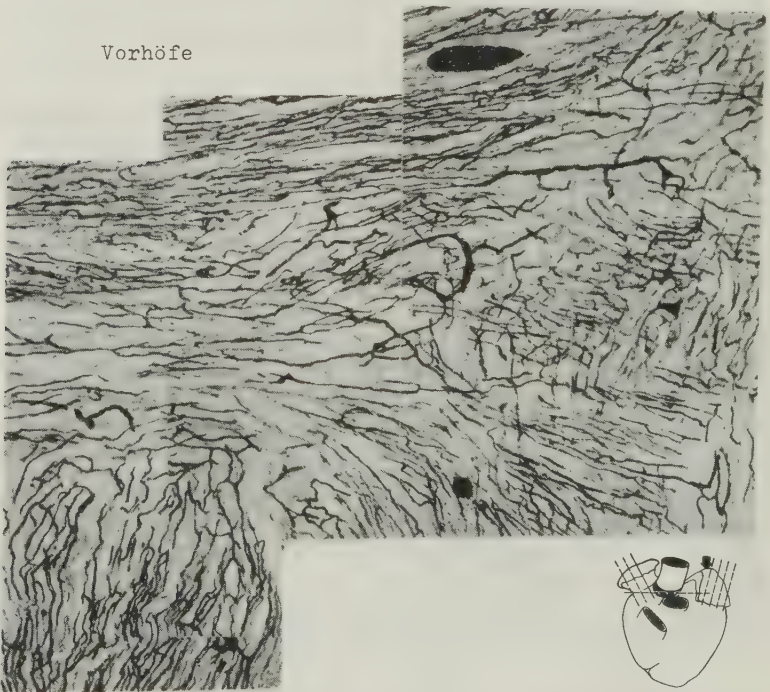


Abb. 77. Mit Wandstärke und Muskelverlauf differenzierendes kapillares Netzwerk (Tusche-Inj.; 100 μ Schnittdicke) Vergr. 120 fach

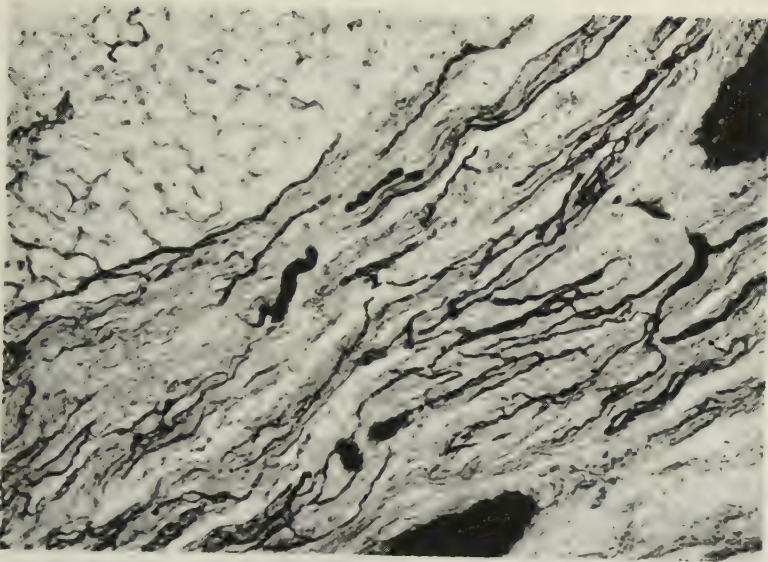


Abb. 78. (Tusche-Inj.)

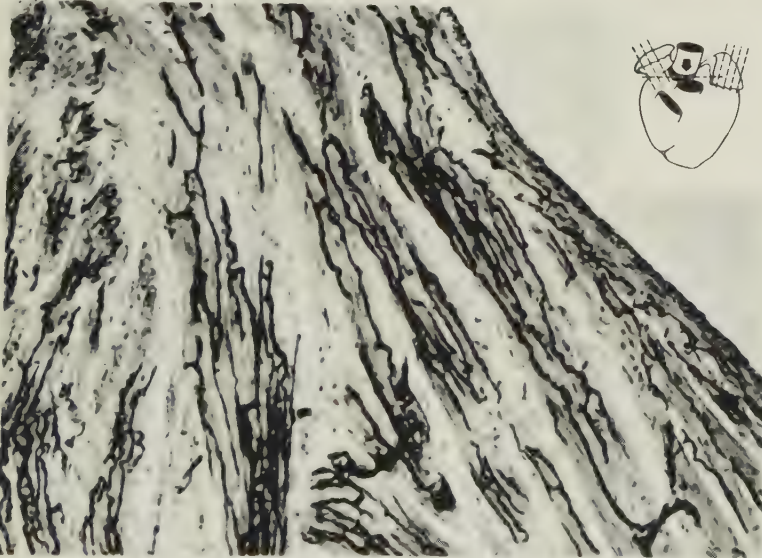


Abb. 79. (Tusche-Inj.; Kernechtrotfärbung)

Abb. 78 u. 79. Rarefiziertes Kapillarmuster im Sinusknotenbereich (100 μ Schnittdicke) Vergr. 200 fach

C. BESPRECHUNG DER ERGEBNISSE UND LITERATURVERGLEICH

Die Umgestaltung der myokardialen Blutversorgung während Onto- und Phylogenese zeigt die sinnvolle Anpassung an die steigende Beanspruchung des Herzens in der Aszendenz der Tierreihe. So bleibt beispielsweise die ursprüngliche Blutversorgung vom Lumen her bei den Amphibien als Endzustand verwirklicht. Nach LÜBBERS und BARBEY (1954) erhält das Myokard dieser Tiere bei der Herzaktion 9/10 seines Sauerstoffbedarfs durch Konvektion und nur 1/10 durch Diffusion. Auch nach Ausbildung eines herzeigenen Gefäßsystems stellt die Verlagerung vom primär intramuralen zum subepikardialen Arterienverlauf, sowie die typische Aufteilung der Arterien eine weitere funktionelle Anpassung des Koronarkreislaufs an die erhöhten Transportanforderungen, bedingt durch die Lebensweise und den dadurch intensiveren Stoffwechsel, dar.

Das Kaninchenherz besitzt nach der Einteilung von BERG (1965) demnach hinsichtlich der Lage und des Verlaufs seiner Gefäße ein recht primitives Muster; d.h. die Koronararterien liegen auf ihrem Hauptverlauf intramural; sie folgen auch nicht den bereits schwach ausgebildeten Interventrikularfurchen. Dagegen ist zwar die primitive strauchartige Verzweigung der Kranzarterien bei den Lagomorphen einer klassischen Zweiteilung der Arteria coronaria sinistra gewichen, die Weiteraufzweigung und -verlauf unterscheiden sich allerdings noch recht erheblich von dem klassischen Muster der höheren Säugetiere.

Es wäre deshalb durchaus denkbar, daß gerade die intramurale Lage der Stammgefäße während der Systole und Diastole eine vom Menschen unterschiedliche Hämodynamik bedingt, die ihrerseits ein spezielles Gefäßmuster der nachgeschalteten Strombahn erforderlich machen könnte, um das funktionstragende Myokard in allen Herzphasen optimal mit Blut zu versorgen.

Die im Kaninchenmyokard relativ häufig vorkommenden endothel ausgekleideten Sinus haben beim adulten Tier sicher keine Bedeutung im Sinne der Nutrition mehr; sie stellen wahrscheinlich nur noch phylogenetische Residuen des embryonalen Schwammwerkes dar, da diese ehemaligen, vom Lumen her tief ins Myokard hineinreichenden Spalten einerseits im Laufe der Herz-

entwicklung bei der Ausbildung der Kompakta komprimiert, andererseits deren freie Kommunikation mit den Herzhöhlen durch eine Endokardschicht verschlossen wurden. Dennoch messen einige Autoren diesen sinusoidalen Spalträumen auch noch beim adulten Tier eine Bedeutung im Rahmen der terminalen Strombahn bei (WEARN, 1928 b; BENNETT, 1936; TRUEX u. Mitarb., 1951, 1952). Die in der Literatur vielfach erwähnten arterio-sinusoidalen und arterio-luminalen Gefäße konnten wir an unseren Präparaten zwar nicht nachweisen, gewisse Schwierigkeiten bei der Injektion, so z. B. Austritt von arteriell injiziertem Kontrastmittel in die Herzhöhlen bei mangelhafter Kapillarbettfüllung, lassen sie jedoch vermuten.

In Übereinstimmung mit mehreren Autoren (WEARN, 1928 a; UNGER, 1938; TRUEX u. SCHWARTZ, 1951) sahen wir an einer Vielzahl der Präparate sog. "Thebesische Venen", d.h. Venen, die parallel zu den inneren Oberflächen verlaufen, deren senkrecht und kurzstämmig in sie mündende kleine Venulen das Blut aus den innersten Muskellagen und subendokardialen Schichten aufnehmen. Diese venösen Gefäße münden vorwiegend intertrabekulär, während sie an den glattwandigen Herzabschnitten seltener nachweisbar sind. Wir schließen uns der Ansicht von TRUEX u. Mitarb. (1951, 1952) an, daß der Abfluß des venösen Blutes der subendokardialen Myokardschichten sowie der Papillarmuskeln fast ausschließlich über diese Thebesischen Gefäße erfolgt. Darüber, daß sie Verbindungen mit dem oberflächlichen Venensystem und zur arteriellen Strombahn eingehen und in welchem Maße sie für die Ernährung des Myokards auf retrogradem Wege ("flow back") von Bedeutung sind, bestehen noch geteilte Meinungen (WEARN, 1928 a; HECHT, 1958; PUFF, 1964). Denkbar wäre es durchaus, daß sie unter pathologischen Bedingungen, d.h. bei Koronararterienverschluß, über angenommene arteriovenöse Anastomosen Bedeutung erlangen können.

Über arterielle Kommunikationen im makroskopischen Bereich bestehen bei Literaturvergleich deutliche artspezifische Unterschiede. Bei unserem Versuchstier erwies sich die sternokostale Fläche des Herzens sowohl im Vorhandensein homo- als auch heterokoronarer Verbindungen bevorzugt gegenüber den dorsal gelegenen Herzwänden.

Während sich arteriovenöse Anastomosen größeren Kalibers nur selten nachweisen ließen, fanden wir über allen Herzabschnitten zahlreiche veno-venöse Verbindungen.

Auf die nur mikroskopisch nachweisbaren arterio-arteriellen, arterio-venösen und veno-venösen Anastomosen wird in einem späteren Abschnitt eingegangen.

Histologische Besonderheiten der Gefäßwand

Die Koronargefäße unterscheiden sich in ihrer histologischen Struktur erheblich von den übrigen Arterien des Körpers. Obwohl sie der Aorta, dem Prototyp eines elastischen Gefäßes, entspringen, werden sie von BUCHER (1944, 1945, 1947, 1949) dem muskulösen Bautyp zugeordnet. Dagegen stellt HIRSCH (1942) die Hauptstämme der Koronararterien zwischen die muskulöse und elastische Bauart, wobei sich der Übergang zum definitiven muskulösen Typ erst bei den mittleren Ästen vollzieht. Die Ausbildung bestimmter Bautypen im Bereich des arteriellen Gefäßbaumes zeigt die morphologische Variabilität der Gefäßwand in funktionell unterschiedlich beanspruchten Herzabschnitten (BUCHER, 1944, 1947).

Die Arterien unseres Versuchstieres zeigen - bedingt durch ihren primär intramuralen Verlauf - allenthalben eine sehr stark entwickelte Media mit innerer Ring- und äußerer Längsmuskelschicht. Daneben fanden wir aber auch die von BUCHER (1944, 1947) beschriebenen Arterien mit innerer Längs- und äußerer Ringmuskelschicht (Septum und Papillarmuskel) sowie die sog. "Zwittergefäße", bei denen sich keine definitive Schichtung der Media erkennen läßt (Sinusknotenbereich).

Neben diesen Unterschieden im Gefäßwandbau, die nach BUCHER (1947) vorwiegend auf die unterschiedliche Längenveränderung einzelner Herzteile während Systole und Diastole zurückzuführen sind, werden noch weitere morphologische Sondereinrichtungen beschrieben; sie stehen vor allem im Dienste der Stromregulierung und ökonomischen Durchblutung des nachgeschalteten Kapillargebietes. Intimapolster, wie sie BUCHER (1945), PUFF (1960), BOUCEK u. Mitarb. (1963, 1965) an Gefäßabgangsstellen

beschrieben, fanden auch wir, in Übereinstimmung mit den von WOLKOFF (1923) an Kaninchenherzen durchgeführten Untersuchungen, vorwiegend an den Verzweigungsstellen der Arteria coronaria dextra. Für die vermehrt kontraktile Fähigkeit dieser Gefäßabschnitte spricht auch der stark positive Ausfall der ATP'ase-Reaktion. Die Darstellung weiterer morphologischer Gefäßwandbesonderheiten, wie z. B. Wicklungstouren der einzelnen Gefäßschichten, Besonderheiten bei arterio-venösen Kurzschlüssen, Verankerung der Gefäße im perivasalen Gewebe u.a.m., mußte in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt bleiben.

Zusammenfassend kann über die Gefäße der Makrozirkulation am Kaninchenmyokard gesagt werden, daß die auffallende Arterienwandstärke bei der primär intramuralen Lage der Stammgefäße sowie der Verlauf der kleineren Äste, der ohne Rücksicht auf den Muskelverlauf erfolgt, eine Kompression während der Systole unwahrscheinlich macht.

Die dünnwandigen, klappenlosen Venen dagegen ziehen in den bindegewebigen Verschiebeschichten zwischen den einzelnen muskulären Wicklungstouren und bieten dem Blut günstige Abflußbedingungen, wobei die einwirkenden Muskelkräfte im Sinne eines "Auspressens" wirksam werden.

Weitere Anpassungen des Gefäßsystems an die örtlichen Erfordernisse werden im Abschnitt der terminalen Strombahn beschrieben.

Die Mikroangioarchitektur der terminalen Strombahn

Im Gegensatz zu den als Blutleiter fungierenden großen Gefäßen besteht die Aufgabe der terminalen Strombahn in der Nutrition des Gewebes. Sie ist der eigentliche Ort des Gas- und Stoffaustausches, und ihre Kenntnis ist die Voraussetzung für das Studium der lokalen Kreislaufregulation. Die terminale Strombahn - gerechnet ab Arteriolen über das kapillare Maschenwerk bis zu den Venulen - wird daher als Funktionseinheit des mikroskopischen Abschnittes des Blutkreislaufes aufgefaßt. Durch organspezifische funktionelle Sondereinrichtungen ergibt sich eine Reihe von Variationsmöglichkeiten, die sich

nicht zuletzt in einer verwirrenden Vielzahl von Termini technici ausdrückt. Der morphologische Bau sowie das pharmakologische und physiologische Verhalten dieses Kreislaufabschnittes wurden an fast allen Organen untersucht, nicht dagegen ihre topographischen Beziehungen zueinander.

Wie vielgestaltig gerade die Bilder der Arteriolen und Venulen in ihrer Form und räumlichen Anordnung sein können, zeigen die umfassenden Untersuchungen PFEIFFER's (1928) am Gehirn; er schloß bereits aus ihren Formen auf differenzierte ortsbedingte Ernährungsfunktionen. Als Untersuchungsobjekt bietet allerdings das Gehirn, bei der gleichen Darstellungs- und Injektionstechnik, die auch wir am Herzen anwandten, wesentlich günstigere Voraussetzungen mit seiner opaken Zwischensubstanz im Gegensatz zu dem kompakten Myokardgewebe und seiner komplexen strukturellen Anordnung. Dennoch haben wir versucht, die Mikroangioarchitektonik des Herzmuskels in der räumlichen Anordnung darzustellen und zu interpretieren, wobei sich sicher durch verfeinerte Technik Deutungsänderungen ergeben können.

Arteriolen

Die Arteriolen entstammen muskelstarken, kleinkalibrigen Arterien. Das Arteriolenbäumchen zeichnet sich von seinem Ursprung an durch seinen eigenartigen "gebrochenen" Verlauf aus: die Seitenäste zweigen fast ausschließlich senkrecht vom arteriolenären Stammgefäß ab, wobei sie in gleichnamiger oder wechselseitiger Richtung zu den einzelnen Muskelfaszikeln ziehen, während der Hauptstamm nicht selten in einer anderen Ebene weiterverläuft. Je mehr sich das Arteriolenbäumchen unter steter Verringerung seines Kalibers aufzweigt, desto kürzer werden die quer zur Muskulatur verlaufenden Gefäßstrecken. Durch die typische Art der Gefäßverzweigung, die in den subepikardialen und innersten Muskelschichten mehr flächenhaft, dagegen intramural fast ausschließlich nach den drei Raumrichtungen erfolgt, wird das gesamte Myokard auf eine sehr ausgewogene Art und Weise von Arteriolen durchzogen; insbesondere können durch die expansive Verzweigungsart weit voneinander entfernte Muskelbezirke von einer gemeinsamen "Stammarteriole" gespeist werden. Der umgekehrte Fall gilt auch für die Blutversorgung der

Muskelfaszikel: sie werden fast ausschließlich von mehr als einem arteriolen Gefäß, nicht zuletzt aus verschiedenen arteriellen Quellen, versorgt. Die eigenartige, an Spalierobst erinnernde Form des Arteriolenbäumchens läßt auf hämodynamische Kräfte des strömenden Blutes schließen. Die typische Verzweigungsart unterliegt wahrscheinlich den gleichen Gesetzmäßigkeiten, die ROUX (1879) für die Ablenkung des Gefäßstammes an den Stellen der Astabgaben der großen Gefäße verantwortlich machte. Wie sehr Form und Funktion sich gegenseitig beeinflussen können, wird deutlich am Beispiel der Arteriolen: während einerseits die Kraft des Blutes das Gefäßbild zu prägen vermag, wird durch die Form des Gefäßverlaufs und durch die kontinuierliche Kaliberabnahme der Seitenäste die ursprünglich formgebende Dynamik der Pulswelle in eine kontinuierliche Strömung zu dem nachgeschalteten Kapillargebiet umgewandelt.

Venulen

Im Gegensatz zu einer geradezu starren Grundform der Arteriolen zeigen die Venulen des Myokards einen großen Formenreichtum, wenn auch nicht in dem gleichen Maße, wie sie PFEIFFER (1928) bei seinen Untersuchungen an der Hirnrinde fand. Das charakteristische Bild der myokardialen Venen ist der büschelförmige Zusammenfluß vieler Postkapillaren zu einer relativ dickkalibrigen Venule ("Rübenwurzelform"). Diese ziehen in schräger Richtung zu den größeren Venen, die vorwiegend in den bindegewebigen, interfaszikulären Zwischenschichten verlaufen. Die räumliche Anordnung der Venulen ist ebenfalls nicht so konsequent wie bei den Arteriolen. Auch erscheint das Zuflußgebiet einer Sammelvene mehr oder weniger willkürlich. Sicher ist aber, daß eine kleinere Vene aus verschiedenen arteriell gespeisten Bezirken Blut abtransportiert.

Bereits der kurze Abriß über Anordnung, Form und Verteilung der Arteriolen und Venulen im Myokard macht deutlich, daß hier der strenge Ablauf nach entwicklungsgeschichtlichen Regeln, wie er sich im Bereich der Makrozirkulation abspielt, durch allgemeinökonomische Gesichtspunkte überdeckt und variiert wird: alles ist auf eine optimale Versorgung des Herzmuskels ausgerichtet. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, wenn gerade dieses Organ mit seiner ununterbrochenen Tätigkeit sich einiger Sondereinrichtungen bedient, die besonders im folgen-

den Abschnitt der terminalen Strombahn, dem Kapillargebiet, hervortreten.

Kapillaren

Erst das vollständig geglückte Injektionspräparat zeigt die ungewöhnlich dichte Vaskularisation des Myokards, besonders im Hinblick auf die Versorgung seiner kleinsten, funktionstragenden Einheit, der Herzmuskelfaser. Die bislang durchgeführten Untersuchungen an Myokardkapillaren bezogen sich auf das Verhältnis Muskelfaser zu Kapillare und wurden ausschließlich an Querschnittpräparaten durchgeführt (WEARN, 1928 b; LINZBACH, 1947 a, b, 1950; HORT, 1955, HECHT, 1958). Anhand der Kapillardichte und der gefundenen arteriellen und venösen Sauerstoffpartialdrucke wurde die Gewebsoxygenierung errechnet, wobei jeder Einzelkapillare durch den am Querschnittpräparat gewonnenen Eindruck einer gleichmäßigen Anordnung ein mathematisch definierter Versorgungsraum zugeordnet wurde. Über diese Modellvorstellung wird im Zusammenhang mit den neueren Befunden am Längsschnittpräparat noch eingegangen. (s. S.53)

LÜBBERS u. FABEL (1964), FABEL u. LÜBBERS (1965), FABEL u. Mitarb. (1964), FABEL (1965) fanden bei vitalmikroskopischen Beobachtungen der subepikardialen und endokardialen Muskelstrombahn am schlagenden Kaninchenherzen besondere Verlaufsformen kapillarer Teilstrecken, denen sie besondere Bedeutung bei der Sauerstoffversorgung des Gewebes zuschrieben. Die differierenden Befunde zwischen den intravital mit der Platinelektrode gemessenen Sauerstoffdruckwerten und den theoretisch anhand des Gewebsmodells errechneten Sauerstoffbedarfs wiesen ebenfalls in die gleiche Richtung.

Aus diesen Erwägungen heraus sollte das bisher unberücksichtigt gebliebene kapillare Längsmuster morphologisch näher untersucht werden. Es war zu prüfen, ob sich die an der inneren und äußeren Herzoberfläche gefundenen kapillaren Verlaufsformen auch in den tieferen Muskelschichten wiederholen, ob sich topographische Besonderheiten ergeben und ob letztlich ein sich rechnerisch nachvollziehbares, herzmuskelspezifisches Versorgungsschema daraus ableiten läßt. Bei dieser zunächst recht einfach erscheinenden Aufgabe ergaben sich jedoch bald große technische Schwierigkeiten.

Durch die komplexe Muskelanordnung des Hohl Muskels Herz fiel die Schnittebene nicht immer mit dem parallelen Muskelfaser-verlauf zusammen; weiter wird die Darstellung eines vollständigen Kapillarmaschenwerkes von der Endverzweigung einer Arteriole bis zum Zusammenfluß einer Venule durch die beschriebene dreidimensionale Verzweigungstendenz eines Arteriolenbaumes sowie die zu verschiedenen venösen Abstromgebieten ziehenden venösen Kapillarschenkel bei der photographischen Darstellung sehr erschwert; dazu kommt die Überlagerung des terminalen Strombahngebietes bei der außerordentlich dichten Gesamtkapillarisation des optisch dichten Myokardgewebes.

Da die vorliegenden Untersuchungen am "toten" Injektionsmaterial durchgeführt wurden, fehlte jeder Hinweis auf die Strömungsrichtung, sowie die Möglichkeit der Wandbeurteilung. Dennoch konnten wir an allen Herzabschnitten - in unterschiedlicher Häufigkeit - auffällige kapillare Verlaufsformen unterscheiden: Kapillaren, die einmal oder mehrfach abrupt von ihrer ursprünglichen Verlaufsrichtung unter Bildung einer haarnadel-förmigen Schleife oder Ausbildung einer S-förmigen Kurve abbiegen. Dabei kann die Verlaufsänderung in der gleichen Ebene erfolgen, oder aber sie umgreifen die Herzmuskelfaser in Form eines Ringsegmentes und begleiten sie in einer anderen Ebene zwar parallel, aber in entgegengesetzter Verlaufsrichtung weiter. Auf seinem Verlauf kommt dieser Kapillarabschnitt mit einer anderen Nachbarfaser in Kontakt und versorgt diese auf ihrem weiteren Verlauf. Die Strömungsrichtung des Blutes muß dabei der ursprünglichen entgegen gerichtet sein. Das gleiche Prinzip der Gegenströmung ergibt sich auch bei folgender Konstellation: Verzweigt sich eine Kapillare im Verlauf einer Herzmuskelfaser derart, daß beide Schenkel nach der Teilung in entgegengesetzter Richtung längs der Myokardfaser weiterlaufen, so herrscht in einem der beiden Teilungsschenkel gegenüber einer zweiten, die gleiche Muskelfaser ungeteilt flankierenden Kapillare ebenfalls eine gegenläufige Strömungsrichtung. Wie viele Kombinationsmöglichkeiten sich hierbei bei Einbeziehung der dritten Dimension ergeben, wird daraus ersichtlich. Neben diesen, innerhalb des kapillaren Maschenwerkes herausgegriffenen, in ihrer physiologischen Bedeutung noch zu diskutierenden Verlaufsformen

müssen auch die interkapillären Anastomosen besprochen werden. Sie stellen strickleiterartige, senkrechte Querverbindungen der Kapillaren dar und unterscheiden sich auf den ersten Blick nicht von der einfachen Aufteilung einer Kapillare, deren Teilstrecken in gleicher Ebene, aber verschiedener Richtung weiterlaufen.

Kapillaranastomosen

Auf Grund der erhobenen Befunde werden interkapilläre Anastomosen, d.h. senkrechte Verbindungen kapillaren Charakters vom Typ I, II und III (in Anlehnung an BROWN, 1965), die sich zwischen parallel angeordneten Kapillaren erstrecken, unterscheiden. Dabei stellt der Typ I solche Querstege dar, die jeweils zwei parallele, unmittelbar benachbarte Kapillaren verbinden, die der Teilung einer terminalen Arteriole entstammen, Typ II solche, die sich in senkrechtem Verlauf über mehrere Kapillaren erstrecken und Endverzweigungen von verschiedenen terminalen Arteriolen, aber einer gemeinsamen Arteriole entstammen. Typ III stellt Kapillaranastomosen dar, die sich über mehrere Muskelfasern hinweg erstrecken und so die Verbindung mit Kapillaren aus verschiedenen arteriolen Gebieten herstellen.

Sowohl am Quer- als auch am Längsschnittpräparat wird ersichtlich, daß jede Muskelfaser allseitig, meist von 4 Kapillaren, flankiert ist, wobei diese Begleitkapillaren durchaus nicht einem gemeinsamen arteriellen Zustromgebiet entstammen müssen. Auch hier ergibt sich wiederum eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. Bezieht man an dieser Stelle die interkapillären Anastomosen der verschiedenen Typen mit ein, so ergibt sich hieraus ein hochdifferenziertes Sicherungssystem für die Sauerstoffversorgung, welches Schädigungen im Bereich der Mikrozirkulation weitgehend zu verhindern sucht.

Welche Schädigungsmöglichkeiten dennoch eintreten können, mögen folgende Beispiele zeigen: Im günstigsten Falle wird eine Muskelfaser von Kapillaren umgeben, die nicht dem selben arteriellen Zustromgebiet entstammen. Setzt sich nun beispielsweise ein Embolus in den kleinsten Zweigen einer "Endarterie" fest, so würde in diesem Falle bei Wegfall der aus der embolisierten Arterie entstammenden Haargefäße kein Funktionsausfall eintreten, da ja noch genügend andere Kapillaren für die Ernährung der

Muskelfaser aufkommen. Da aber andererseits gerade bei der Vielzahl der Möglichkeiten der kapillaren Anordnung rund um eine Muskelfaser durchaus auch der ungünstigste Fall vorliegen kann, wobei die Myokardfaser von Kapillaren, die dem gleichen arteriellen Stromgebiet entstammen, umgeben ist; diese Herzmuskelfaser würde bei Embolisierung der vorgeschalteten Arterie bzw. Arteriole der Nekrose anheimfallen.

Wie weit nun über die beschriebenen interkapillären Verbindungen von benachbarten Kapillargebieten Blut im Sinne eines "Shuntmechanismus" abgeleitet werden kann, hängt einerseits ab von der topographisch doch sehr unterschiedlichen Anastomosendichte, andererseits dem funktionell bedingten Sauerstoffbedarf der betroffenen Herzmuskelzelle.

Dafür, daß diese Querverbindungen im kapillaren Maschenwerk "Sicherheitsventile" zwischen Orten unterschiedlich ausgeschöpften Kapillarblutes darstellen, spricht ihr vermehrtes Auftreten, besonders des Types I, am venösen Kapillarschenkel, kurz vor Zusammenfluß zu einer Venule. Umgekehrt lassen diejenigen Herzabschnitte, in denen die interkapillären Anastomoscn konstant häufiger vorkommen, beispielsweise in beiden, vorwiegend aber im linken Ventrikel auf einen hohen Sauerstoffverbrauch schließen. Hierbei wären diese Seitenkanäle zur Sicherung der Gewebsdurchblutung äußerst sinnvoll. Ihr spärliches Auftreten in den Papillarmuskeln sowie den beiden Vorhöfen läßt dagegen eine geringere Arbeitsleistung bzw. geringeren Sauerstoffbedarf dieser Herzpartien vermuten. Theoretisch erklärbar wäre aber auch ihr Vorhandensein damit, daß sie während der Herzaktion in Systole und Diastole die Blutströmung in bestimmte Richtungen lenken. Eine Beziehung der interkapillären Anastomoscn zu den Disci intercalares konnte nicht nachgewiesen werden.

Extrakapilläre Anastomoscn

Im Gegensatz zu der reichen Anastomosierung im Kapillarbett sind die Verbindungen zwischen Arteriolen bzw. arteriolär-venuläre Kommunikationen relativ spärlich. Bei Durchsicht unserer Präparate fanden wir Anastomoscn zwischen Arteriolen vorwiegend in den mittleren Muskelschichten beider Ventrikel. Sie stellen im allgemeinen nur dünnkalibrige, praekapilläre Verbindungen

dar. Stärkere Verbindungen der arteriolen Gefäße dagegen - auch in ihrer zahlenmäßigen Häufigkeit - konnten im Septum interventriculare nachgewiesen werden. Dies entspräche auch der bereits im makroskopischen Bereich beschriebenen stark ausgebildeten arteriellen Drainage und könnte durchaus zu einer Sicherung der posterioren Herzfläche beitragen, da ja die Zweige der linken und rechten Arteria coronaria die hintere Interventrikularfurche nicht ganz erreichen. Arteriolo-venuläre Anastomosen, die an unseren Präparaten lediglich bei Anwendung einer Doppelinjektion nachweisbar waren, sahen wir häufig in den subepikardialen Muskelschichten, seltener dagegen in den mittleren Myokardlagen - nie dagegen in den Innenschichten.

Wie weit sie bei Ruhedurchblutung unter Umgehung des Kapillargebietes oder anderweitige funktionelle Bedeutung erlangen, kann im Rahmen unserer Untersuchungen nicht entschieden werden. Vom hämodynamischen Standpunkt wirken sie eher der Nutrition entgegen. Die bei den arterio-venösen Anastomosen geforderten morphologischen Wandkriterien mußten an unserem Injektionsmaterial unberücksichtigt bleiben. Differenzierte Angaben über die A.V.A. an Herz- und Skelettmuskel machen HOERR (1947), STAUBESAND (1955, 1959), STAUBESAND u. HAMMERSEN (1956), CLARA (1956), SAUNDERS u. Mitarb. (1957), ILLIG (1961). Weiterhin mußte an unserem Injektionsmaterial die Frage nach sog. Strom- und Netzkapillaren, d.h. Kapillaren, die dauernd bzw. nur bedarfsweise durchströmt werden, offen bleiben. MÜLLER (1937) und GIESE (1957) messen diesen differenten Kapillarformen besondere Aufgaben bei dem Nähr- und Gasstoffwechsel zu.

Kapillarlängen

Auch die von physiologischer Seite immer wieder gestellte Frage nach der effektiven Kapillarlänge, die ohne Berücksichtigung der Vernetzung der Kapillaren untereinander aus der Entfernung von terminaler Arteriole zu Postkapillare bzw. Venule immer wieder gestellt wurde, kann am Myokard infolge der bereits mehrfach erwähnten ausgeprägten dreidimensionalen Verzweigungstendenz der Arteriolen, der Überlagerung der Versorgungsgebiete nur an wenigen Stellen unserer Präparate beantwortet werden. Die

Ergebnisse reichen aber für eine statistisch signifikante Beurteilung nicht aus. Dennoch sollen die an topographisch verschiedenen Orten des Myokards gefundenen "Gesamtkapillarlängen", d.h. Entfernung von Arteriole bis Venule, nicht unerwähnt bleiben. Es wurden allerdings lediglich jene Stellen unserer Schnittpräparate verwendet, in welchen sich der Abgang der Kapillare aus einem arteriolen Seitenast (terminale Arteriole) bis zu ihrem Übergang in eine Venule bzw. Postkapillare in einer Schnittebene befand.

Hierbei ergaben sich hinsichtlich einzelner Herzabschnitte auffallende Werte: Die Kapillarlängen in den subepikardialen Zonen beider Ventrikel betragen im Mittel $400\ \mu$, die Entfernung von Arteriole zu Venule im linken Ventrikel $200 - 300\ \mu$, im rechten Ventrikel $370 - 500\ \mu$. Das Septum interventriculare zeigte die größten Schwankungen mit Werten von $360 - 680\ \mu$. Die längsten Kapillargesamtstrecken fanden wir in den Papillarmuskeln mit $600 - 800\ \mu$. Die subendokardialen Lagen beider Ventrikel wiesen Werte von durchschnittlich $500\ \mu$ Länge auf. Die differierende Entfernung Arteriole-Venule und damit die "effektive Kapillarlänge" könnte dahin gedeutet werden, daß die für den linken Ventrikel gefundenen kürzesten Kapillarstrecken für einen großen Nährsubstratbedarf des Gewebes sowie für einen steilen Sauerstoffdiffusions-Gradienten bzw. hohe O_2 -Ausnutzung sprechen, gemäß der funktionell stärksten Beanspruchung bei der Herzarbeit. Die subepikardialen Muskelschichten müssen den gefundenen Werten zufolge einen beiderseits gleichen Sauerstoffbedarf haben, während die anastomosensarmen, extremen Kapillarlängen der Papillarmuskel entweder einen geringeren Sauerstoffbedarf des Parenchyms aufweisen - oder aber daß gerade hier noch andere Ernährungsquellen in Frage kommen. Dasgleiche gilt auch für die subendokardialen Schichten der Ventrikelmuskulatur.

Die bei Literaturvergleich hinsichtlich der Kapillarlängen angegebenen spezies- und organspezifischen Werte dürften sich auf die Myokardkapillaren nicht anwenden lassen. Nach der Formel von HÖSSLIN (1899) soll sich die Kapillarlänge bei Messungen an homologen Extremitätenmuskeln je nach Größe der Tierart nach der Formel $\lambda = e \cdot K^x$ ändern.* Das bedeutet also, daß die mittlere

* λ = Kapillarlänge; e = Konstante; K = Körpergröße;
 x = Exponent, der $0,1 - 0,18$ beträgt.

Kapillarlänge mit der Körpergröße der Spezies ansteigt und sich umgekehrt proportional zur mittleren Arbeitsleistung des jeweiligen Muskels verhält. HÖSSLIN (1899) findet als mittlere Kapillarlänge am Kaninchenmuskel 545 μ (Unterschenkel) - 775 μ (Oberschenkel), SPALTEHOLZ (1924) ebenfalls beim Kaninchen 430 - 1000 μ , beim Hund dagegen 600 - 1000 μ , und HOYER (1903) beim Menschen nur 200 μ . HAMMERSEN (1964) maß am Adductor magnus der Kaninchen Werte, die von 600 - 1000 μ streuten, wobei er besonders darauf hinweist, daß die von einer terminalen Arteriole nach entgegengesetzter Richtung abgehenden Kapillaren in ein und demselben Muskelfaszikel verschiedene Längen aufweisen können.

Diskussion der unterschiedlichen Kapillarmuster an topographisch und funktionell verschiedenen Herzabschnitten

PFEIFFER (1928) folgert bereits aus seinen an allen Teilen der Hirnrinde durchgeführten Untersuchungen der terminalen Strombahn und vorgeschalteten kleineren Arterien und Venen, da gleiche oder sehr ähnliche angioarchitektonische Strukturen an verschiedenen Stellen der Cortex auftreten, daß auch die Funktionsweise und damit der Nähr- und Sauerstoffverbrauch dieser Gebiete entsprechend sein muß. Auf unser Untersuchungsgut übertragen, haben wir ebenfalls versucht, anhand der beschriebenen differenzierten Kapillarmuster im Hinblick auf die Länge, Dichte, interkapilläre Anastomosen und Sonderverlaufsformen innerhalb der einzelnen Herzmuskelschichten, sowie spezieller Bilder der Arteriolen und Venulen Rückschlüsse auf die Versorgung des Myokards zu ziehen.

Zusammenfassend fanden wir an unseren Präparaten sowohl die Querschnitte der einzelnen Herzmuskelfasern als auch der Faszikel des linken Ventrikels deutlich erhöht gegenüber dem rechten. Die Kapillaren scheinen in den intramuralen Schichten dichter gelagert, was im Widerspruch zu dem nur gering differierenden Verhältnis der auf eine Herzmuskelfaser entfallenden Kapillarlänge zwischen rechtem und linkem Ventrikel stehen müßte. Dieses dichtere Kapillarbild am relativ dicken, aufgehellten Myokardlängsschnitt kommt unserer Meinung nach dadurch zustande,

daß Kapillarschleifen, die von einer Kapillare gebildet werden, sich zwischen den vorgegebenen Parallelverlauf längs der Muskelfaser einschieben und dadurch die Herzmuskelfaser des linken Ventrikels dichter umspinnen. Desgleichen sind die interkapillaren Anastomosen, vorwiegend des Types I und II, zahlreicher, die kapillaren Teilstrecken, d.h. das Maschenwerk wird dadurch kürzer. Aber auch die gesamte Kapillarlänge in ihrer Entfernung von Arteriole zu Venule ist in den intramyokardialen Schichten des linken Ventrikels kürzer (200 - 300 μ) als an gleichen Stellen des rechten Ventrikels (370 - 500 μ). Für den größeren Nähr- und Sauerstoffbedarf bei gleichzeitig höherem Angebot spricht die auffallend dichte Anordnung der Arteriolenbäumchen.

Normalerweise würde für alle größeren Muskelfaserquerschnitte der linksventrikulären Einzelfasern der Versorgungsradius einer Kapillare als unzureichend angesehen werden müssen. Wahrscheinlich bieten aber bei der erwähnten Arteriolendichte die reichlich vorhandenen interkapillaren Anastomosen zusätzliche Ernährungsquellen durch ihre Verbindungsmöglichkeiten mit weiteren arteriellen Versorgungsgebieten. Daneben spielen bei der Sicherung der Blutversorgung die bereits mehrfach erwähnten kapillaren Sonderformen (Schleifenbildung, Gegenströmung u. dgl.) ebenfalls eine Rolle. Möglicherweise hat auch die relativ geringe Längenausdehnung einer Muskelfaser, abgeleitet aus dem geringeren Abstand der Disci intercalares im linken Ventrikel eine Bedeutung.

In den intramuralen Zonen des rechten Ventrikels stehen dagegen die Arteriolenbäumchen nicht so dicht. Auch die arterio-venuläre Entfernung, d.h. die Kapillarlänge, ist im rechten Myokard mit 370 - 500 μ größer als links; desgleichen sind die zusätzlichen Ernährung dienenden Sonderformen und interkapillären Anastomosen nicht so häufig anzutreffen. Dagegen fällt eine Zunahme der venösen Radikel auf, was auf einen schnellen Abtransport des schlackenreichen, O_2 -armen Blutes aus dem weniger günstig versorgten rechtsventrikulären Myokard schließen läßt. Die auf den ersten Blick oftmals dichter erscheinende Kapillarisation des rechtsseitigen Myokards ist wahrscheinlich auf den geringeren Muskelfaserquerschnitt zurückzuführen. Interessant

wäre es noch, zu untersuchen, wieweit sich Anordnung und Differenzierung des terminalen Strombahnmusters des embryonalen von dem des adulten Herzens unterscheiden, d.h. wie weit das definitive Herzgefäßmuster durch funktionelle Faktoren geprägt wird.

Die subepikardialen Schichten aller Herzabschnitte weisen keine Besonderheiten ihrer Kapillarstrukturen auf. Die Kapillargesamtlänge wurde mit durchschnittlich 400 μ über beiden Herzabschnitten bereits erwähnt. Eine dichtere Kapillaranordnung, wie sie REYNOLD et al. (1958) in den subepikardialen Schichten des linken Ventrikels fand, konnten wir an unseren Präparaten nicht nachweisen.

Die epikardialen Muskeilagungen werden von den intramural verlaufenden Arterienhauptästen her durch relativ kleinkalibrige Äste quasi retrograd ernährt. Da diese Schichten beim Kaninchen nur aus wenigen Muskellagen bestehen, ist es nicht weiter verwunderlich, daß der für die intramuralen Schichten so typische dreidimensionale Aufzweigungscharakter der Arteriolen mehr ins Flächenhafte abgewandelt ist. Hierbei ist auffallend, daß dann Arteriolen und Venulen alternierend nebeneinander zu liegen kommen. Das vermehrte Vorkommen arterio-venöser Anastomosen in den subepikardialen Schichten wurde bereits erwähnt. Aber auch hier stellen nur äußerst kleinkalibrige Äste praekapillaren Charakters die Verbindung her. Ein Vergleich mit den von HAMMERSEN (1964) an den oberflächlichen Schichten der Skelettmuskulatur beschriebenen und als "Bügelkapillaren" bezeichneten Formen liegt nahe.

Ein ganz anderes Bild dagegen bietet das subendokardiale Kapillarbild beider Ventrikel. Hier fanden wir in Übereinstimmung mit WEARN (1928 b), LINZBACH (1947 a u. b, 1950), HORT (1955), HECHT (1958) das kapillare Maschenwerk lockerer und breiter, die Kapillarlängen größer. Die Entfernung von Arteriole zu Venule beträgt in den subendokardialen Schichten beider Ventrikel durchschnittlich 500 μ . Hier sind die interkapillaren Anastomosen seltener.

Wie aus pathologisch-anatomischen Untersuchungen von BÜCHNER (1939, 1958), LINZBACH (1950, 1958) und KORB (1966) hervorgeht,

bleiben bei Infarzierung der inneren Muskellagen sowie bei der chronischen Herzinsuffizienz die subendokardialen Schichten weitgehend schädigungsfrei. Im Gegensatz dazu fallen bei toxischen Prozessen (z.B. Diphtherie), wie aus den Untersuchungen von OHEIM (1938) hervorgeht, besonders die innersten Muskelschichten der Nekrose anheim.

Diese Tatsache legt die Vermutung nahe, daß dieses Gebiet nicht allein durch die von den Arteriolen der inneren Muskelschichten entstammenden Kapillaren versorgt wird, sondern zusätzliche Ernährungsquellen, beispielsweise durch transendokardiale Versorgung per diffusionem vom Herzlumen her, eine Rolle spielen müssen. Die Kapillaren reichen zwar an allen Stellen bis dicht an die innere Oberfläche, jedoch sind die parallelen Schenkel weiter gestellt als in den tieferen Myokardschichten. Durch die unterschiedlich ausgebildete Endokarddicke kommt es zur scheinbar differenten Entfernung der Kapillaren von der inneren Oberfläche. Die Endokardschicht beträgt an den glattwandigen Ausflußbahnen nur etwa Muskelfaserbreite, während ihre Dicke besonders im Trabekelwerk ein Vielfaches ausmacht. HECHT (1958) teilt die Endokardschicht je nach Dicke in 4 Klassen ein (10 - 40 μ). Auch er findet trotz zunehmender Endokarddicke keine Zunahme der Kapillarkonzentration, obwohl doch mit zunehmender Endokardstärke eine Abnahme der Diffusion zu erwarten wäre. Daß dies offenbar nicht der Fall ist, könnte dahin ausgelegt werden, daß das trabekuläre Maschenwerk, an dem die Endokardschicht am stärksten ausgebildet ist, eine erhebliche Oberflächenvergrößerung der Herzinnenfläche bedingt. Das in die Maschen eindringende Blut hat eine größere Verweildauer als vergleichsweise während des kurzen Vorbeiströmens an den Ausflußbahnen, sodaß im Trabekelwerk trotz größerer Distanz zu den Kapillaren noch günstige Diffusionsbedingungen bestehen.

Weiterhin wurde von den obengenannten Autoren der Querschnitt der subendokardialen Herzmuskelfaser statistisch signifikant größer gefunden als an anderen Herzabschnitten. Da aber die Kapillardichte geringer und somit der Versorgungsradius der Einzelkapillare unzureichend wäre, spricht es ebenfalls für die Annahme einer zusätzlichen Ernährung vom Lumen her. LINZBACH (1947 b) beschreibt in seinen Untersuchungen am menschlichen Herzen die ersten 8 - 10 Muskellagen unter dem Endokard kapil-

larärmer. Er hält die ganze Kapillarisierung der subendokardialen Schichten für eine "geradezu typische Ökonomie des Organismus": an den Stellen, wo auf anderem Weg als über die Kapillaren günstige Sauerstoff-Diffusionsbedingungen bestehen, fehlt der Anreiz zur Kapillareinsprossung. Durch die unterschiedliche Sauerstoff-Sättigung des rechts- und linksventrikulären Ventrikelblutes müßte dadurch ein Unterschied in der Kapillarisierung zu erwarten sein, was jedoch nicht der Fall ist.

KRETZ (1927), WEARN (1928 a) und UNGER (1938) vertreten die Ansicht, daß bei Kranzgefäßverschlüssen die rückläufige Versorgung der inneren Herzmuskelschichten durch Thebesische Venen eine Rolle spielen kann. Diese Ansicht wird noch sehr widersprüchlich bewertet.

Eine Sonderstellung in der Blutversorgung nehmen ebenfalls die Papillarmuskeln ein (RIBBERT, 1897; AMENOMYIA, 1910; BUCHER, 1947). Hier kommt es - im Gegensatz zu den subendokardialen Schichten - trotz allseitiger Umspülung mit Blut gehäuft zur Schwielenbildung. Wie erwähnt, stehen die Arteriolen an der Basis dicht, jedoch nimmt ihre Zahl apikalwärts rapid ab. Desgleichen begegnen wir hier den längsten Kapillaren (600 - 800 μ) und den wenigsten interkapillaren Anastomosen. Nach Auffassung BUCHERs (1947) beruht die leichte Schädigungsmöglichkeit der Papillarmuskel auf der besonders hohen Beanspruchung während aller Phasen der Herzaktion, besonders in axialer Richtung mit starkem Wechsel in der Längsausdehnung. Die großen Gefäße versuchen dieser Dauerbeanspruchung durch eine entsprechend entwickelte Längsmuskulatur auszugleichen. Sie soll nach BUCHER (1947) eine Abknickung während der Kontraktion verhindern. Die gesamte venöse Drainage der Papillarmuskeln erfolgt über Thebesische Venen, die an den Fußpunkten der Papillarmuskeln ins Lumen münden.

Das kapillare Maschenwerk der Vorhöfe und Aurikel ist irregulär, großmaschig; es läßt weitgehend die strenge Anordnung der Muskelfasern und somit auch der Kapillaren vermissen. Eine Unterscheidung zwischen rechtem und linkem Vorhof haben wir nicht getroffen. Detaillierte Angaben hierüber macht CLARKE (1965); er fand Unterschiede im Arteriolen- und Kapillarmuster sowohl zwischen rechtem und linkem Vorhof als auch deren "rough and smooth portions".

Die Blutversorgung, der Sauerstoffbedarf und das Kapillarmuster des Reizleitungssystems waren häufig Studienobjekte (KOLMER u. FLEISCHMANN, 1927; BUADZE u. WERTHEIMER, 1928; WEARN, 1928 b; GALLO, 1956; BRETSCHNEIDER, 1958; GOERTTLER, 1964; BROWN, 1965; SCHIEBLER, 1956, 1961, 1963.)

Das Gebiet des Sinusknotens zeigt stark verzweigte, plasmareiche, fibrillenarme Muskelfasern, dazwischen reichlich kollagenes Bindegewebe. Was das Gefäßbild betrifft, so sind die Kapillaren am stärksten rarifiziert im Vergleich zu allen anderen Herzabschnitten; sie bilden große, polygonale Maschen; dabei fanden wir besonders gehäuft interkapillare Anastomosen vom Typ III.

Das Auffinden des ventrikulären Reizleitungssystems bereitete trotz des angegebenen größeren Faserquerschnittes - selbst bei Anwendung verschiedener Spezialfärbungen große Schwierigkeiten. Wahrscheinlich beruht es auf der von SCHIEBLER (1953) geäußerten Tatsache, "daß die Unterscheidung der Purkinje-Fasern von der Arbeitsmuskulatur umso geringer ist, je kleiner die Tierart ist" und "daß der Glykogennachweis besonders bei Nagern sehr schwach ausfällt"(WALLS, 1948). Die Untersuchungen an den Purkinje'schen Fasern ergeben einen geringeren Mitochondriengehalt und lassen dadurch auf einen geringeren energieverbrauchenden Vorgang schließen, wie der WARBURGSche Versuch mit dem verminderten Sauerstoffbedarf beweist; somit wäre auch die geringere Kapillarversorgung erklärbar (SCHIEBLER, 1961). Nach GOERTTLER (1964) umschließen die subendokardialen RLS-Fasern hülseförmig erweiterte Lymphräume, denen er eine Rolle als "Druckrezeptoren" zuschreibt.

Ultramikroskopische und histochemische Kapillarbeurteilung

Daß fast jedes Organ auf Grund seiner unterschiedlichen Aufgaben neben einem typischen Kapillarmuster auch einen speziellen Aufbau der Kapillarwand aufweist, wurde bereits lichtmikroskopisch erschöpfend untersucht (KROGH, 1929; ILLIG, 1961). Aber erst die Elektronenmikroskopie eröffnet neue Einblicke in die Grundstrukturen der einzelnen Bauelemente der Kapillarwand (BARGMANN, 1958, 1964). Neben die alten Begriffsvorstellungen des Durchtritts durch die Kapillarwand über Interzellularlücken

und Stomata treten neue wie Membranvesikulation und Cytopempsis. Der Transport des Nährsubstrats zu dem Filter der Basalmembran beruht letztlich auf der aktiven Tätigkeit des fermentreichen Endothelplasmas und seines unterschiedlichen Enzymmosaiks. (MOORE u. RUSKA, 1957; BENNETT, LUFT u. HAMPTON, 1959; KISCH, 1957, 1963; RENKIN, 1963; RUSKA, 1964).

Mit der Untersuchung speziell der Herzkapillaren haben sich besonders DAVID u. HECHT (1961) beschäftigt. Sie fanden die Basalmembran in einer Stärke von 360 - 480 Å. Im Gebiet des Kernes wölbt sich die Endothelzelle ins Lumen vor, in den übrigen Teilen ist eine flache Auskleidung mit Zellausläufern zu beobachten. Das Zytoplasma weist nur wenige Mitochondrien auf, dagegen lassen sich eine große Zahl pinocytotischer Bläschen als Zeichen eines regen Stoffwechsels der Zelle erkennen.

Histochemische Untersuchungen am Herzmuskel und seiner Kapillaren führten HORT u. HORT (1958) mittels der alkalischen Phosphatase und BARNETT (1964) mit der ATP-ase-Reaktion durch. BOURNE (1960) wandte beide Methoden zur Untersuchung des Enzymmusters der Myokardfasern, Disci intercalares und Kapillaren am embryonalen und adulten Herzen an. An unserem Material scheiterte zwar eine differenziertere Darstellung der histochemischen Reaktionen zwischen Endothelzellen und übrigen Wandschichten infolge der großen Schnittdicke. Im allgemeinen kann gesagt werden, daß die ATP-ase-Reaktion bereits nach kurzen Inkubationszeiten vorwiegend in der glatten Muskulatur der Arteriolen und Arterien sowie der Herzmuskulatur, besonders deutlich an den Disci intercalares, auftritt; dagegen stellen sich die Kapillaren erst nach längerer Inkubation dar. Übereinstimmend mit BANNISTER u. ROMANUL (1963) geben die Kapillaren bereits nach kurzer Einwirkungszeit deutlich positiven Reaktionsausfall bei der alkalischen Phosphatase-Reaktion. Die letztgenannten Autoren stellten eine auffallend starke Reaktion an den senkrecht abgehenden Arteriolenzweigen mit einem Durchmesser von 15 - 20 μ fest. In unseren Präparaten konnten diese Befunde nicht exakt zur Darstellung gebracht werden.

Daß das Enzymmuster der terminalen Strombahn nicht systematisierbar ist, beweisen die Untersuchungen von HERZOG u. AMON (1966).

Graduell unterschiedlichen Reaktionsausfall der alkalischen Phosphatase an den Kapillaren, wie sie KLINGMÜLLER (1958) an der Haut und LANG u. Mitarb. (1966) an Pleurakapillaren zur Differenzierung von arteriellem und venösem Kapillarschenkel beschreiben, konnte an unserem Material nicht mit genügender Sicherheit nachgewiesen werden. Dagegen zeigten die Krümmungsstellen der sog. "Haarnadelkapillaren" fast regelmäßig höhere Schwärzungsgrade. Ihre Deutung muß zunächst noch offen bleiben.

Physiologische Betrachtung

Für das Studium der lokalen Kreislaufregulation, der Wechselwirkung zwischen Blut und Gewebe sind die Kenntnis der strukturellen Anordnung, die morphologischen Besonderheiten ihrer Wandelemente sowie das enzymatische Mosaik des letzten Abschnittes der terminalen Strombahn, der Kapillaren, von ausschlaggebender Bedeutung (OPITZ u. SCHNEIDER, 1950). Während der Durchtritt von Elektrolyten, Wasser, Nährsubstraten (insbes. Glukose), Plasmaproteinen und korpuskulären Elementen auf dem Prinzip der Osmose, Filtration bzw. Ultrafiltration beruht und jeweils ganz bestimmte morphologische Strukturen der Kapillarwand (Stomata, Interzellularlücken, Membranvesikulation sowie Cytopempsis) voraussetzt, erfolgt der Durchtritt der Atemgase durch die Kapillarwand mit großer Schnelligkeit, aber auch nach völlig anderen Gesetzmäßigkeiten als bei den gelösten Substanzen. Hier stehen physikalisch erklärbare Transportmechanismen an der Kapillarwand solchen eines aktiven Transportes gegenüber, die an die biochemischen Besonderheiten des fermentreichen Endothelplasmas geknüpft sind und nur durch energiefördernde Prozesse enzymatischer Natur aufrechterhalten werden. Während allgemein angenommen wird, daß die Gase ausschließlich per diffusionem reaktionslos die Kapillarwand passieren, glauben BENNETT, LUFT und HAMPTON (1959), daß die lipoidlöslichen Stoffe, also auch die Gase, beim Durchtritt durch die Basalmembran in irgendeine Beziehung zu den polarisationsoptisch erschlossenen intralamellären Lipoidenlagerungen treten. Zwar stellt die Gasdiffusion nur eine Teilfunktion der Kapillarwand dar, für die Gewebsatmung ist sie jedoch von ausschlaggebender Bedeutung.

Da die Atmungsaktivität der Herzmuskulatur besonders hoch ist, hängt die ausreichende Versorgung der Einzelelemente von der Schnelligkeit ab, mit welcher der für die aerobe Atmung erforderliche Sauerstoff zu den Mitochondrien (Sarkosomen) herangebracht wird (OPITZ u. LÜBBERS, 1957). Für die Gewebsatmung ist zwar der Sauerstoffdruck (pO_2) die treibende Kraft, aber außerdem maßgebend ist die Kapillardistanz im Gewebe und damit der Versorgungsradius der Einzelkapillare (LÜBBERS, 1958). Neben dem Partialdruck spielt ebenfalls der Diffusionskoeffizient für Sauerstoff des betreffenden Gewebes eine Rolle. (HORSTMANN, 1959, 1964). Nachdem es dem Arbeitskreis unter LÜBBERS u. FABEL gelungen war, sowohl an den subepi- und subendokardialen Schichten des Myokards als auch durch Mikropunktionen mit der von LÜBBERS entwickelten Platinelektrode intramural am schlagenden Warmblütlerherzen (Kaninchen) die Sauerstoffdrucke zu messen und sie dabei Druckfelder fanden, die weit unter den bisher theoretisch errechneten Werten lagen, galt es, die alte Modellvorstellung der Gewebsversorgung kritisch zu überprüfen und evtl. zu revidieren.

Nach dem von KROGH (1918/19, 1929) angegebenen Versorgungsmodell stellte man sich das Gewebe aufgeteilt in einzelne Gewebszylinder vor, in denen jeweils zentral eine Kapillare verläuft. Von ihr aus diffundiert der Sauerstoff vorwiegend senkrecht zur Strömungsrichtung nach dem Gesetz der gerichteten Diffusion von höherer zu geringerer Sauerstoffkonzentration in das Gewebe ab.

Der Versorgungsradius einer Kapillare wird jeweils von dem in ihr herrschenden O_2 -Partialdruck bestimmt. Konstante Gewebsatmung vorausgesetzt, sowie die Annahme parallel verlaufender Kapillaren mit jeweils benachbarten arteriellen Schenkeln, war die Kapillardichte bislang das einzige Maß für den Sauerstoffverbrauch einer umschriebenen Gewebsregion. Der begrenzende Faktor der Gewebsversorgung und somit des KROGH'schen Gewebszylinders war der pO_2 am venösen Schenkel einer Kapillare.

Da dieses Modell nicht restlos befriedigte, ersetzte THEWS (1960, 1962) den KROGH'schen Gewebszylinder durch eine Säule mit sechseckiger Grundfläche, wobei die sog. "tödlichen Ecken",

die durch das Aneinanderlegen von Kreisen entstehen, besser erfaßt werden. Auch bei der neuen Vorstellung THEW's wurde die Annahme der parallel liegenden arteriellen Kapillarschenkel beibehalten.

Da aber auch hieraus die an manchen Stellen gefundenen niedrigen Sauerstoff-Partialdrucke des venösen Blutes, ohne daß Hypoxie- oder Anoxiezeichen auftraten, nicht erklärbar waren, kam DIEMER (1965) zu der Annahme, daß bei parallel verlaufenden Kapillaren die arteriellen Schenkel durchaus nicht benachbart liegen müssen, sondern daß vielmehr eine alternierende Lage von arteriellen neben venösen Abschnitten vorliegen kann. Diese Überlegung führte zu einer Unterteilung des Gewebes nicht mehr in Zylinder, sondern in Kegel. Da aber am arteriellen Schenkel mit seinem dort herrschenden hohen Sauerstoff-Partialdruck ein größerer Bereich versorgt wird als an seinem venösen Ende, andererseits aber auch am venösen Ende durchaus noch Sauerstoff in Gewebe, wenn auch entsprechend geringer, abdiffundiert, wird aus dem Versorgungsradius einer Kapillare ein Kegelstumpf. Dieser stellt sich als strukturell günstiger und ökonomischer dar, da hier keine "tödlichen Ecken" mehr auftreten, sondern sogar Gewebsbezirke mit O_2 -Überschuß vorhanden sein können.

Anwendung der "Modellvorstellungen" auf das Myokard

Da die Kapillaren auf mehr oder weniger große Strecken den parallel angeordneten Muskelfasern folgen, entsteht der bereits von LINZBACH (1958, 1960) am Querschnittpräparat angegebene "Kapillarraster"; dabei flankieren im Durchschnitt etwa vier Kapillaren eine Faser. Diese Anordnung imponiert an unseren Längsschnitten als "Versetzung" der Kapillarabstände um eine halbe Maschenbreite, jeweils auf zwei Kapillarebenen bezogen.

Es soll an dieser Stelle noch einmal betont werden, daß die Myokardkapillaren zwar vorwiegend parallel laufen, aber durchaus nicht auf die gesamte Längsausdehnung einer Faser; dazu kommen die interkapillären Anastomosen und die regulären kapillaren Versetzungen sowie zusätzlich die bereits mehrfach beschriebenen kapillären Sonderverlaufsformen mit ihren Schleifen und Ringsegmentbildungen. Dadurch wird jede Faser von einem

säulenförmigen Kapillarnetzwerk umgeben. Diese komplexe Anordnung der kapillaren Strombahn wird ausschließlich durch die stereoskopische Betrachtung des Längsschnittes erfaßt.

Allein aus der architektonischen Anordnung der Kapillaren - trotz deren zumindest auf kleinem Areal streng vorgegebenem Gewebsaufbau - wird bereits ein Sicherungsprinzip der Versorgung deutlich. Dazu kommt noch die Verbindungsmöglichkeit zu Blutquellen aus verschiedenen arteriolen Gebieten - insbesondere über Anastomosen des Types II und III. Die Frage, wie weit sich die Strömungsrichtung des Blutes, neben den regulären Verzweigungen im Kapillarbereich, während des Ablaufs der einzelnen Herzphasen ändert, kann anhand unserer "toten" Präparate nicht beantwortet werden. Soviel aber kann gesagt werden: daß die Anordnung des kapillären Maschenwerkes nicht zufällig sein kann, sondern nach streng ökonomischen Gesichtspunkten ausgerichtet ist. Dafür sprechen auch die unterschiedlichen Befunde an topographisch verschiedenen Myokardgebieten bzw. ähnliche Kapillarmuster an vergleichbaren Orten funktionell bedingten Sauerstoffbedarfs. Als Beispiel dafür möge nochmals die Häufigkeit interkapillarer Anastomosen bei insgesamt kurzen Kapillarstrecken der linken Ventrikelkompakta mit ihrer stärksten funktionellen Beanspruchung dem langen, anastomosenarmen kapillären Maschenwerk der subendokardialen Schichten sowie der Papillarmuskel gegenübergestellt werden, wo zusätzliche transendokardiale Ernährungsquellen wirksam werden. Ein weiteres Beispiel gesicherten Sauerstoffangebotes bietet ebenfalls der Anastomosenreichtum kurz vor der Vereinigung der Kapillaren zu einer Venule.

Pathologisch-anatomisch werden die histologisch erhobenen Befunde der kapillären Anordnung bestätigt durch tierexperimentelle Untersuchungen von KORB (1966). Er fand nach experimenteller Infarzierung bzw. temporärer Hypoxämie am Katzenmyokard durch Fluoreszenztechnik partielle Nekrosen von Herzmuskelfasern; dies spricht ebenfalls für die von uns im vorangehenden Kapitel beschriebenen unterschiedlichen "Abstammungen" der Kapillaren und deren Anordnung um die Myokardfaser. Weiterhin dürften die interkapillären Verbindungen und damit die Möglichkeit der zusätzlichen Sauerstoffversorgung aus benachbarten arteriellen Versorgungsgebieten für die unterschiedliche Ausdehnung einer Infarzierung bei einer Mikroembolie oder Hypoxydase

beitragen. Diese Mikroinfarkte müßten dann vorwiegend durch ihre Längsausdehnung charakteristisch sein. BROWN (1965) gibt eine ähnliche Erklärung über die Entstehungsursachen der disseminierten Herzmuskelschwelen.

Welche Bedeutung die sog. "Haarnadelkapillaren" für die Versorgung der Myokardfasern haben, ist vorerst nur theoretisch erklärbar. LIERSE (1964) findet derartige Kapillarschleifen oder "loopings" auch in der Gehirnstrombahn verschiedener Tierspezies. Da diese kapillaren Verlaufsformen den Henle'schen Schleifenbildungen der Tubuli ähneln, wäre ein äquivalenter Mechanismus auch für die Kapillarfunktion denkbar:

Während es an der Niere im "Haarnadelgegenstromprinzip" an der Schlingenkuppe zu einer Konzentration der Salze kommt, könnte auch - wie LIERSE (1964) folgert - in den "Haarnadelkapillaren" durch Verschiebung der Affinität für Sauerstoff in den Erythrozyten des arteriellen und venösen Kapillarabschnittes ein Druckgefälle vom venösen in den arteriellen Schenkel und damit eine O_2 -Diffusion (vom venösen zum arteriellen Schenkel!) auftreten, wobei es auch hier - wie an der Niere durch eine Summation vieler Einzeleffekte schließlich zu einer O_2 -Anschoppung an der Kapillarschlingenkuppe kommt; an dieser Stelle ist der Gasaustausch sehr groß. An unseren Präparaten sahen wir diese Kapillarschleifenbildung - neben deren Vorkommen im "normalen" Kapillarnetzwerk - häufig an eine Arteriole oder auch kleine Arterie herantreten und zum venösen Abflußgebiet zurücklaufen.

Daß die O_2 -Diffusion nicht ausschließlich durch die Kapillärwände erfolgt, sondern daß bereits ein Durchtritt durch die Wände der kleinsten Arterien und Arteriolen stattfinden muß, läßt sich unschwer aus den Übersichtsbildern unserer Injektionspräparate folgern: wie bereits im allgemeinen Teil beschrieben, erscheint das Kapillarbett in der Umgebung der kleinen Arterien und Arteriolen rarifiziert, während eine Verdichtung des kapillaren Maschenwerkes im venösen Gefäßgebiet auffällt. Die gleichen morphologischen Befunde erhebt HORT (1955) am Querschnittspräparat. Das bedeutet, daß die Rolle der Kapillaren von den für O_2 durchgängigen Gefäßwänden selbst übernommen wird. Im negativen Fall, d.h. bei Embolisierung einer kleinen Arterie oder Arteriole treten Nekrosebezirke vorwiegend

periarteriell bzw. periarteriellär auf (KRUG, 1966). An dieser Stelle könnte den an die kleinen Arterien und Arteriolen herantretenden Kapillarschlingen eine Sicherungsaufgabe in der O_2 -Versorgung unterstellt werden: durch die O_2 -Anschoppung an der "Haarnadelkuppe" erhält das kapillararme Gewebe um die kleinen Arterien und Arteriolen zusätzlich Sauerstoff.

Unsere erste Annahme, daß durch die an die Arterien und Arteriolen herantretenden Schleifen das venöse Kapillarblut "aufgebessert" werden könnte, wurde auf Grund der Erklärung LIERSE (1964) über die "gerichtete Diffusion" an der Haarnadelkuppe wieder verworfen. Die scheinbar größere Paralleldistanz der Kapillaren unmittelbar nach Aufzweigung einer terminalen Arteriole wäre mit dem höheren O_2 -Partialdruck in diesen Gebieten und damit mit einem größeren Versorgungsradius erklärbar. Weiter geben die bei stereoskopischer Betrachtung dicker Schnitte gewonnenen Bilder Hinweise auf eine äußerst ausgeglichene Versorgung des Myokards: das Raumbild zeigt in seiner zweiten und besonders in seiner dritten Dimension eine mehr oder weniger ausgeprägt alternierende Lage von arteriellen und venösen terminalen Stromabschnitten, die durch die dreidimensionale Arborisation der Arteriolen überaus komplex wird. Durch dieses Raumgitterprinzip kommt es zu Konstellationen, wobei arterielle und venöse Pole der Kapillaren nicht räumlich getrennt liegen, sondern sich überschneiden, so daß arterielle und venöse Kapillarschenkel abwechselnd nebeneinander zu liegen kommen. In den schmalen subepikardialen Myokardschichten ähnelt die Gefäßanordnung der des Skelettmuskels. Bei beiden kommt es infolge der mehr flächenhaften Muskelanordnung zwar ebenfalls zur abwechselnden Lage von Arteriolen und Venulen; hier liegen aber die arteriellen Kapillarabschnitte den venösen gegenüber, es fehlt jedoch die Versetzung der beiden Gefäßtypen in der dritten Dimension. Dadurch fällt die Konstellation, bei der arterielle Kapillarabschnitte unmittelbar neben venöse zu liegen kommen, weg. Weiterhin kommen in den subepikardialen Schichten häufiger Verbindungen zwischen Arteriolen, sowie arterio-venöse Anastomosen vor. Die arteriellen Verbindungen könnten am ehesten den "Arteriennetzen II. Ordnung", die arterio-venösen

Kommunikationen praekapillaren Kalibers den "Bügelkapillaren" am Skelettmuskel gleichgesetzt werden (HAMMERSEN).

In Anbetracht der unterschiedlichen Gefäßanordnung in den einzelnen Schichten könnte man per definitionem nach STAUBESAND (1956, 1961) für die äußeren - und im erweiterten Sinne auch für die inneren Muskellagen die Bezeichnung "Netzarterien", und für die Ringschichten bzw. Kompakta den Begriff "Endarterien" verwenden. Nach STAUBESAND finden sich Endarterien grundsätzlich dort, "wo die nachgeordneten Kapillaren ein tiefgestaffeltes, dreidimensionales Netzwerk bilden, die Netzarterien dagegen vorwiegend an Oberflächen verlaufen oder Kapillargebiete speisen, denen ein mehr flächenhafter, zweidimensionaler Charakter zukommt."

Problematisch wird der Versuch, das Muster der terminalen Strombahn einer Modellvorstellung, deren Prinzip mathematisch nachvollziehbar ist, zuzuordnen. Cum grano salis kann zwar gesagt werden, daß nach der Art der Gefäßanordnung in den äußeren und inneren Schichten die Gewebsversorgung nach dem KROGH'schen Gewebszylindermodell bzw. nach der revidierten Auffassung von THEWS (1960, 1961) in Anwendung gebracht werden kann, während in der Kompakta die Versorgung vorwiegend nach den neueren Vorstellungen DIEMERS in Frage kommt. Doch zeigt das morphologische Bild auch in diesen Schichten Gefäßsituationen, wo neben dem für die Ernährung theoretisch viel günstigeren Kegelstumpfmodell nach DIEMER (1965) der Gewebszylinder KROGH's (1918/19, 1929) bzw. der variierte Zylinder mit sechseckiger Basis THEWS's Gültigkeit hat.

Herzaktion und Durchblutung

Im Unterschied zum Skelettmuskel, der erst nach Ablauf seiner Tätigkeit seine O_2 -Reserve auffüllt, atmet der Herzmuskel während seiner Tätigkeit (LÜBBERS, 1958), d.h. es liegt eine konstante Gewebsatmung vor. In der Literatur besteht allerdings noch keine Einstimmigkeit über die Blutversorgung des Herzens während der systolischen und diastolischen Aktion. Nach GROTE und THEWS (1962) erfolgt die Durchblutung wahrscheinlich im Rhythmus seiner Kontraktion mit einem Maximum in der Diastole.

In der Systole ist der Blutstrom eingeschränkt; die Kapillaren bleiben aber wenigstens teilweise mit Blut gefüllt.

Das Parenchym dagegen hat das Maximum seines O_2 -Bedarfs bzw. seiner O_2 -Aufnahme während der Systole; dagegen besteht während der Diastole nur ein Basalverbrauch. Bei der Herzarbeit und der Durchblutung der Kapillaren kommt es dadurch zu periodisch verschobenen Maxima.

Daß sich während der einzelnen Herzphasen für die einzelnen Herzabschnitte, z.B. Papillarmuskel und Herzzinnenwandschichten sowie epikardiale Muskellagen, unterschiedliche Bedingungen ergeben, zeigen die Arbeiten von BÜGER und PALADE (1931), HOCHREIN (1932), ENGSTRAND (1942), GREGG (1950), SCHÜTZ (1955, 1958), MÜLLER (1962).

Wie die vorliegenden Beschreibungen der terminalen Strombahn zeigen, besteht eine unübersehbare Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten für den Stoffaustausch und die Gewebsoxygenierung. Alle Konstellationen aber zeigen ein bemerkenswertes Ökonomieprinzip, das sich nicht allein bereits im makroskopischen, sondern weit hinein in die Dimensionen des mikroskopischen und submikroskopischen Aufbaues offenbart.

Obgleich es uns nicht gelang, aus dem Muster der terminalen Strombahn des Myokards die für die Physiologen wichtige Frage eines rechnerisch nachvollziehbaren Bauprinzips abzuleiten, kann gesagt werden, daß alle geltenden Modellvorstellungen, die ja immer den Nachteil der großen Vereinfachung in sich bergen, nebeneinander vorkommen und nach funktionellen Bedürfnissen eine strukturelle Abwandlung erfahren.

Vielleicht beinhalten aber die beschriebenen anatomisch-morphologischen Befunde doch gewisse Äquivalente für die physiologischen Meßergebnisse. Wie weit allerdings die am Kaninchenmyokard erhobenen Befunde auch auf das menschliche Myokard übertragen werden können, muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

D. ZUSAMMENFASSUNG

An 30 Kaninchenherzen wurde mittels Perfusion und nachfolgender Injektion von Tusche, gefärbter Gelatine oder Plastoid das makro- und mikrozirkulatorische Strombett dargestellt. Hierbei ergaben sich bereits in der Beurteilung der großen herzeigenen Gefäße Unterschiede in Verlauf, Lage und Verzweigungsmodus bei Vergleich mit Herzen anderer Säuger. Mit Ausnahme ihres Anfangsteiles verlaufen die Koronararterien intramyokardial. Bei einigen Tieren kommt es zu einer am höheren Säugerherzen unbekannten Dreiteilung der Arteria coronaria sinistra durch Abgang einer starken Septumarterie. Ein weiterer Unterschied zeigt sich in der Beziehung der Gefäße zum Sulcus coronarius und den Interventrikularfurchen. Die Arterien verlaufen in der Ventrikelmuskulatur schräg, oft strauchartig aufgeteilt, zur Herzspitze; die Ausbildung der Rami interventriculares posteriores ist inkonstant. Die sternokostale Fläche und das Septum interventriculare sind dicht vaskularisiert und weisen eine große Anzahl hetero- und homocoronarer Anastomosen auf.

Im Rahmen der Mikrozirkulation zeigt das Kaninchenmyokard Besonderheiten im Aufbau der terminalen Strombahn, die sich wesentlich von der der Skelettmuskulatur unterscheiden. Zwar verlaufen auch am Herzen, durch den vorgegebenen parenchymatischen Aufbau die Kapillaren parallel zu den Herzmuskelfasern, jedoch übernimmt die Einzelkapillare nur auf einer Teilstrecke die Versorgung der anliegenden Myokardfaser und biegt, oft unter Ringsegmentbildung, in eine andere Ebene oder Richtung um. Hierbei kommt es häufig zur Ausbildung der als "Haarnadelkapillaren" beschriebenen Verlaufsformen. Daneben bestehen Verzweigungen und Kapillaranordnungen, die allein aus dem morphologischen Bild auf Gegenstromprinzipien schließen lassen. Alle Herzabschnitte zeigen in unterschiedlicher Häufigkeit die strickleiterartig angeordneten senkrechten interkapillären Anastomosen. Hiervon werden drei Typen unterschieden, die nicht selten Kapillarbezirke entfernter arterieller Zuflußgebiete bzw. arteriolärer Stammgebiete verbinden. Ihre Bedeutung bei der Blutströmung während der einzelnen Herzphasen, ihre mög-

liche Funktion als "Sicherheitsventile" bei Hypoxie und Mikro-embolien wird diskutiert.

Ferner wurde die räumliche Anordnung der terminalen Strombettgefäße, die Dichte und Längen der Kapillaren, sowie kapilläre Sonderformen in den einzelnen Herzabschnitten untersucht:

- a) Die subepikardialen Myokardschichten beider Ventrikel zeigen gleiche Muster und Längen der Kapillaren ($400\ \mu$). Anastomosen zwischen Arteriolen, sowie arteriolar-venuläre Verbindungen treten gehäuft auf. Die relativ schmalen Herzaußenschichten bedingen eine alternierende Lage von Arteriolen und Venulen.
- b) Das terminale Strombahnmuster der Kompakta beider Ventrikel zeichnet sich durch eine dichte Anordnung der Arteriolen aus. Die Arteriolen und Venulen zeigen in ihrer Anordnung ein Raumgitterprinzip mit teilweiser Überlagerung ihrer Kapillargebiete. Die Kapillarlängen differieren in beiden Ventrikeln: die durchschnittliche Länge beträgt im linken Ventrikel $300\ \mu$, die des rechten $400\ \mu$. Desgleichen häufen sich im linken Ventrikel kapillare Sonderformen (Haarnadelformen und Anordnungen mit Gegenströmungsmechanismus), sowie interkapillare Anastomosen des Types I und II. Das rechtsventrikuläre Myokard weist eine zusätzliche praedominante venöse Drainage, das Septum interventriculare ein vermehrtes Vorkommen großlumiger Lymphgefäße auf.
- c) Für geringeren Sauerstoffbedarf bzw. zusätzliche transendokardiale Diffusion sprechen die großen Kapillarlängen der subendokardialen Schichten beider Ventrikel ($500\ \mu$) und der Papillarmuskeln ($600 - 800\ \mu$) bei gleichzeitiger Armut an interkapillaren Anastomosen.
- d) Ebenfalls auf geringen Sauerstoffbedarf läßt das lockere Kapillarmuster der Vorhöfe und Aurikel schließen.
- e) Die weitesten Kapillarmaschen zeigt der Sinusknoten.

Das Vorkommen und die Bedeutung der Thebesischen Venen und myokardialen Sinus wird diskutiert.

Durch die differente Anordnung der terminalen Strombahngefäße ergeben sich neue Diskussionsgrundlagen für die Sauerstoffversorgung des Myokards. Neben die frühere Vorstellung der Gewebs-

versorgung, der der KROGH'sche Gewebszylinder bzw. das von THEWS abgeänderte Modell zugrunde lag, wird dem von DIEMER entwickelte Kegelstumpfmodell vorrangige Bedeutung bei der Diffusion des Sauerstoffs zuerkannt. Im untersuchten Material werden an einigen Stellen beide Versorgungsprinzipien nebeneinander gefunden. Daß für das gesamte Myokard kein allgemeines Bauschema der Endstrombahn und damit ein rechnerisch nachvollziehbares Modell für die Versorgung der kleinsten funktionstragenden Einheit des Herzens aufgestellt werden kann, ist mit der unterschiedlichen Beanspruchung der einzelnen Herzabschnitte und den damit verbundenen hämodynamischen Faktoren zu erklären. Dies zeigt sich bereits im Mikroskopischen in der Vielzahl der auftretenden Variationsmöglichkeiten bei gleichbleibender Grundarchitektur sowohl des Parenchyms als auch des ernährenden mikrozirkulatorischen Apparates an topographisch verschiedenen Orten.

E. LITERATUR

- AMENOMIYA, R.: Über die Beziehungen zwischen Coronararterien und Papillarmuskel im Herzen. Virchows Arch. path. Anat. 199, 187 - 213 (1910).
- ANGELKOS, E.T., P. BERNARDINI u. W.C. BARRETT: Myocardial fiber size and capillary ratio in the right and left ventricles of the rat. Anat. Rec. 4, 671 - 676 (1964).
- BANNISTER, R.G. u. F.C. ROMANUL: The localization of alkaline phosphatase activity in cerebral blood vesicles. J. Neurol. Neurosurg. Psychiat. 26, 333 - 340 (1963).
- BARGMANN, W.: Die Morphologie der Kapillaren. In: Kapillaren und Interstitium. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1955.
- BARGMANN, W.: Über die Struktur der Blutkapillaren. Dtsch. med. Wschr. 83, 1704 - 1710 u. 1711 - 1712 (1958).
- BARGMANN, W.: Histologie und mikroskopische Anatomie des Menschen. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1964.
- BARGMANN, W. u. W. DOERR: Das Herz des Menschen. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1963.
- BARNETT, R.J.: Localization of enzymatic activity of the fine structural level. J. roy. micr. Soc. 83, 143 - 151 (1964).
- BAROLDI, G., O. MANTERO u. G. SCOMAZZONI: The collaterals of the coronary arteries in normal and pathologic hearts. Circulat. Res. 4, 223 - 229 (1956).
- BENNETT, H.S.: The development of the blood supply to the heart in the embryo pig. Amer. J. Anat. 60, 27 - 53 (1936).
- BENNETT, H.S., J.H. LUFT u. J.C. HAMPTON: Morphological classification of the vertebrate blood capillaries. Amer. J. Physiol. 196, 381 - 390 (1959).
- BENNINGHOFF, A.: Blutgefäße und Herz. In: Handb. der mikroskopischen Anatomie des Menschen, Bd. VI/1, Springer-Verlag, Berlin 1930.
- BENNINGHOFF, A.: Architektur des Herzmuskels. Morph. Jb. 67, 262 - 317 (1931).

- BERG, R.: Zur Morphologie der Coronargefäße des Schweines unter besonderer Berücksichtigung ihres Verhaltens zum Myokard. Arch. exp. Vet.-Med. 19, 1145 - 1307 (1965).
- BETZ, E.: Möglichkeiten und Grenzen der Registrierung der Myokarddurchblutung mit Wärmeleitsonden. Vortrag vor der Med. Ges. Marburg/Lahn am 11.7.1966.
- BÜGER, A. u. G.W. PALADE: Zur Frage der Abhängigkeit der Coronardurchblutung von der Herzaktion. Klin. Wschr. 2, 2207 - 2208 (1931).
- BOUCEK, R.J., R. TAKASHITA u. R. FOJACO: Relation between micro-anatomy and functional properties of the coronary arteries (dog). Anat. Rec. 147, 199 - 207 (1963).
- BOUCEK, R.J., R. TAKASHITA u. A.H. BRADY: Microanatomy and intramural physical forces within the coronary arteries (man). Anat. Rec. 153, 233 - 242 (1965).
- BOURNE, G.H.: Structure and function of muscles. Acad. Press, New York and London 1960.
- BRÄNEMARK, P.J.: Experimental biomicroscopy. Bibl. anat. 5, 51 - 55 (1964)
- BRETSCHNEIDER, A.J.: Über den Mechanismus der hypoxischen Coronarerweiterung. In: Probleme der Coronardurchblutung. Bad Oeynhausener Gespräche, Springer-Verlag, Berlin 1958.
- BROWN, R.E.: The pattern of the microcirculatory bed in the ventricular myocardium of domestic mammals. Amer. J. Anat. 116, 355 - 373 (1965).
- BUADZE, S. u. E. WERTHEIMER: Der Glykogengehalt des RLS im Herzen. Arch. Ges. Physiol. 219, 233 - 237 (1928).
- BUCHER, O.: Über den Bau der Blutgefäße des menschlichen Herzens. Anat. Anz. 95, 395 - 424 (1944).
- BUCHER, O.: Sondervorrichtungen an Kranzgefäßen. Schweiz. med. Wschr. 75, 966 - 969 (1945).
- BUCHER, O.: Über den Bau der Blutgefäße des menschlichen Herzens. Acta anat. 3, 162 - 189 (1947).

- BUCHER, O.: Einige Bemerkungen zur Arbeit HIRSCH über "Grundsätzliches zur Frage der Regulationseinrichtungen im Coronarkreislauf". *Acta anat.* 8, 185 - 188 (1949).
- BÜCHNER, F.: Die Coronarinsuffizienz. Th. Steinkopf-Verlag, Dresden 1939.
- BÜCHNER, F.: Morphologische Befunde und Elektrokardiogramm bei Durchblutungsstörungen des Herzmuskels. In: Funktionsstörungen des Herzens. Springer-Verlag, Berlin 1958.
- CHING-YUEN-LEE, J.: Vascular pattern in the red and white muscle of rabbit. *Anat. Rec.* 132, 597 - 611 (1958).
- CHRISTENSEN, G.C.: The blood supply of the interventricular septum of the heart; a comparative study. *Amer. J. vet. Res.* 23, 869 - 874 (1962).
- CLARA, M.: Die arterio-venösen Anastomosen. Springer-Verlag, Wien 1956.
- CLARKE, J.A.: An X-ray-microscopic study of the pattern and distribution of capillary bed in the atria of human heart. *Z. Anat. EntwGesch.* 324, 471 - 477 (1965).
- CRAINICIANU, A.: Anatomische Studien über die Coronararterien und experimentelle Untersuchungen über ihre Durchgängigkeit. *Virchows Arch. path. Anat.* 238, 1 - 75 (1922).
- CROSSMON, C.: The selective staining of red blood cells. *Stain technol.* 15, 155 - 157 (1940).
- DAVID, H. u. A. HECHT: Submikroskopische Strukturveränderungen der Herzmuskelkapillaren im Infarktgebiet. *Zbl. allg. Path. path. Anat.* 103, 68 - 73 (1961).
- DAY, S.B. u. J.A. JOHNSON: The distribution of the coronary arteries of the rabbit. *Anat. Rec.* 132, 633 - 642 (1958).
- DIEMER, K.: Über die O₂-Diffusion im Gehirn. I. Mitteilung. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* 285, 99 - 108 (1965).
- DIEMER, K.: Über die O₂-Diffusion im Gehirn. II. Mitteilung. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* 285, 109 - 118 (1965).
- DRY, T.J.: The capillary bed of the heart; demonstrated by injecting perfused hearts. *Proc. Staff med. Mayo Clinic (Roch.)* 10, 189 - 191 (1935).

- ENGSTRAND, L.: Untersuchungen über die periphere Blutversorgung des Herzmuskels. Acta physiol. scand. 3, 224 - 237 (1942).
- FABEL, H.: Normale und kritische Sauerstoffversorgung des Herzens. In: Bad Oeynhausener Gespräche 1965 (im Druck).
- FABEL, H. u. D. LÜBBERS: Mesures polarographiques de la consommation d'oxygène du coeur étalé ouvert de grenouille en contractions régulières prolongées in vitro. Soc. Chim. Biol. 46, 811 - 817 (1964).
- FABEL, H., B. RYBAK u. D. LÜBBERS: Die Messung des Sauerstoffdruckes auf die Herzzinnenfläche in situ und ihre Bedeutung. Pflügers Arch. ges. Physiol. 279, 29. Tagung der Physiol. Ges. Bad Nauheim 1964.
- FABEL, H. u. D. LÜBBERS: Measurements of reflecting spectre of the beating heart in situ. Biol. Zbl. 341, 351 - 356 (1965).
- GALLO, P.: A study on the topographical and quantitative relations between capillaries and fibers on the conducting system of the heart and their functional significances. Cardiologia 29, 241 - 253 (1956).
- GIESE, W.: Über die Endstrombahn der Lunge. In: Bad Oeynhausener Gespräche, Springer-Verlag, Berlin 1957.
- GOERTTLER, K.: Über Sonderstrukturen im Verlauf des RLS. Verh. anat. Ges. 59, Erg.-H. 113, 285 - 295 (1964).
- GOMORI, G.: Microtechnical demonstration of phosphatase in tissue-sections. Proc. Soc. exp. Biol. 42, 23 - 26 (1939).
- GRANT, R.T.: The development of coronary vessels in rabbit. Heart 13, 261 - 284 (1926).
- GREGG, D.E.: The coronary circulation in health and disease. Lee u. Febiger Verlag, Philadelphia 1950.
- GROSS, L.: The blood supply to the heart in its clinical and anatomical aspects. Hoeber-Verlag, London 1921.
- GROTE, J. u. G. THEWS: Die Bedingungen für die Sauerstoffversorgung des Herzmuskelgewebes. Pflügers Arch. ges. Physiol. 276, 142 - 165 (1962).

- HAMMERSEN, F.: Das Gefäßmuster der Skelettmuskulatur. Bad Oeynhausener Gespräche VI v. 29. u. 30.10.1962, Springer-Verlag, Berlin 1964.
- HAMMERSEN, F. u. J. STAUBESAND: Über Stromwege der Nierenkapsel von Mensch und Hund; zugleich ein Beitrag zum Begriff der arterio-venösen Anastomosen. Z. Anat. EntwGesch. 122, 363 - 381 (1961).
- HECHT, A.: Zur capillaren Gefäßversorgung der subendocardialen Muskelschichten im menschlichen Herzen. Virchows Arch. path. Anat. 331, 26 - 35 (1958).
- HEGAZI, A.: Die Blutgefäßversorgung des Herzens von Rind, Schaf, Ziege. Zbl. Vet. Med. V, 776 - 818 (1958).
- HERZOG, V. u. H. AMON: Vergleichende histochemische Untersuchungen über den Phosphatasegehalt der Kapillaren. Verh. anat. Ges.(Basel) 61, 513 - 518 (1966).
- HIRSCH, S.: Über den feineren Bau der Kranzgefäße, insbesondere über das Vorkommen autonomer Gefäßstrecken im menschlichen Herzen. Cardiologia VI, 105 - 135 (1942).
- HOCHREIN, M.: Der Coronarkreislauf. Springer-Verlag, Berlin 1932.
- HOERR, N.L.: Capillary circulation. In: O. GLASSERs "Medical physics" Year Book Publ. Chicago 1947.
- HORSTMANN, E.: Abstand und Durchmesser der Kapillaren im Zentralnervensystem verschiedener Wirbeltierklassen. (Structure and function of cerebral cortex.) Proc. Soc. Int. Meet. Neurobiol. Amsterdam 1959, 59 - 63. D.B. TOWER and J.P. SCHADE edit.
- HORSTMANN, E.: Das Muster der Blutgefäße. In: Bad Oeynhausener Gespräche VI v. 29. - 30.10.1962, Springer-Verlag, Berlin 1964.
- HORT, W.: Quantitative histologische Untersuchungen an wachsenden Herzen. Virchows Arch. path. Anat. 323, 223 - 242 (1953).
- HORT, W.: Quantitative Untersuchungen über die Kapillarisierung des Herzmuskels im Erwachsenen- und Greisenalter, bei Hypertrophie und Hyperplasie. Virchows Arch. path. Anat. 327, 560 - 576 (1955).

- HORT, W.: Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen am Myokard verschieden stark gefüllter linker Kammern. Virchows Arch. path. Anat. 333, 523 - 581 (1960).
- HORT, W.: Quantitative Untersuchungen über den Einfluß der Fixierung, Entwässerung und Einbettung auf die Herzmuskulatur. Zbl. wiss. Mikr. 65, 16 - 21 (1961).
- HORT, W. u. H. HORT: Beiträge zur Histochemie der Blutgefäßendothelien und der Kapillargrundhäutchen. Virchows Arch. path. Anat. 331, 591 - 615 (1958).
- HÖSSLIN, H.v.: Beitrag zur Mechanik der Blutbewegung. Dtsch. Arch. klin. Med. 66, 103 - 130 (1899).
- HOYER, H.: Injektion der Blut- und Lymphgefäße. Encykl. mikr. Techn. 546 - 556 (1903).
- HYRTL, S.: Die Corrosionsanatomie. Wien 1873.
- ILLIG, L.: Die terminale Strombahn. Springer-Verlag, Berlin 1961.
- JAMIN, F. u. H. MERKEL: Die Corrosionsanatomie des menschlichen Herzens in Stereoröntgenbildern. Gustav-Fischer-Verlag, Jena 1905.
- JOHNS, T.N.P., M.D. SANFORD u. A. BLALOCK: An experimental study of the anastomosis of arteries to the coronary sinus of the dog. Bull. Johns Hopkins Hosp. 87, 1 - 20 (1950).
- KADAR, F.: Topographische Beziehungen zwischen arteriellen und venösen Kranzgefäßen des Herzens. Anat. Anz. 103, 112 - 115 (1956).
- KADAR, F.: Die topographischen Verhältnisse zwischen Gefäßen und Muskelfasern des Herzens. Anat. Anz. 113, 381 - 386 (1963).
- KAZZAZ, D. u. M. SHANKLIN: The coronary vessels of the dog demonstrated by colored plastic (venylacetate) injections and corrosion. Anat. Rec. 107, 43 - 59 (1950).
- KISCH, B.: Elektronenmikroskopische Untersuchungen des Herzens und der Kapillaren. Dtsch. med. Wschr. 17, 605 - 606 (1957).
- KISCH, B.: Electron microscopy of the capillary wall. The fili-form processes of the endothelium. Exp. Med. Surg. 21, 1 - 12 (1963).

- KLINGMÜLLER, G.: Die Darstellung alkalischer Phosphatase in Kapillaren. *Hautarzt* 9, 84 - 88 (1958).
- KOLMER, W. u. W. FLEISCHMANN: Über den Sauerstoffverbrauch der Purkinje'schen Fasern. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* 218, 530 - 531 (1927).
- KORB, G.: Morphologische Veränderungen im Herzmuskel der Katze nach einer permanenten oder temporären Coronargefäßunterbindung. Vortrag vor der Med. Ges. Marburg/Lahn am 4.7.1966.
- KRETZ, J.: Über die Bedeutung der Venae minimae thebesii für die Blutversorgung des Herzmuskels. *Virchows Arch. path. Anat.* 266, 647 - 675 (1927).
- KROGH, A.: The number and distribution of capillaries in muscles with calculation of the oxygenpressure head necessary for supplying the tissue. *J. Physiol., Lond.* 52, 409 - 415 (1918/19).
- KROGH, A.: Anatomie und Physiologie der Kapillaren. Springer-Verlag, Berlin 1929.
- KRUG, A.: Tierexperimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Wiederbelebungszeit der Herzmuskelzellen. Vortrag vor der Med. Ges. Marburg/Lahn am 4.7.1966.
- LANG, J., H. PICHELMAIER u. J. NUMBERGER: Über eigenartige Kapillarkonvolute der Pleura parietalis. *Z. Zellforsch.* 70, 114 - 130 (1966).
- LIEBOW, A.A., M.H. HALES, G.K. LINDSKOG u. W.E. BLOOMER: Plastic demonstration of pulmonary pathology. *Int. Ass. Mus. Bull.* 27, 110 - 115 (1947).
- LIERSE, W.: Histochemische und elektronenoptische Untersuchungen an Kapillaren verschiedener Entwicklungsstufen des Gehirns. *Anat. Anz.* 115, 110 - 155 (1964).
- LINZBACH, A.J.: Das ökonomische Prinzip in der Sauerstoffversorgung der Nieren, des Herzens und der Stützgewebe. *Z. inn. Med.* 2, 144 - 152 (1947 a).
- LINZBACH, A.J.: Mikrometrische und histologische Analyse hypertrophierter menschlicher Herzen. *Virchows Arch. path. Anat.* 314, 534 - 615 (1947 b).

- LINZBACH, A.J.: Die Muskelfaserkonstante und das Wachstumsgesetz der menschlichen Herzkammern. Virchows Arch. path. Anat. 318, 575 - 618 (1950).
- LINZBACH, A.J.: Struktur und Funktion des kranken und gesunden Herzens. In: Funktionsdiagnostik des Herzens. Freiburger Symposium 1958, Springer-Verlag, Heidelberg.
- LINZBACH, A.J.: Pathologische Anatomie der Herzinsuffizienz. In: Handb. d. Inn. Med. IX, 727 - 791 (1960).
- LÜBBERS, D.: Die Gewebsatmung der Herzmuskelfaser. In: Bad Oeynhausener Gespräche, 32 - 43, Springer-Verlag, Göttingen 1958.
- LÜBBERS, D. u. K. BARBEY: Die Bedeutung der Wandstruktur für die O_2 -Versorgung des Froschherzens. Pflügers Arch. ges. Physiol. 260, 87 - 103 (1954).
- LÜBBERS, D. u. H. FABEL: Redoxveränderungen der Atmungskette während Normoxie und Hypoxie am schlagenden Warmblüterherzen "in situ". Verh. Dtsch. Ges. KreislForsch. 30. Tagung 1964.
- MARCHESI, V.T. u. R.J. BARNETT: The demonstration of enzymatic activity in pinocytotic vesicles of blood capillaries with the electron microscope. J. Cell Biol. 17, 547 - 556 (1963).
- McMANUS, J.F.A.: Histological demonstration of mucin after periodic acid. Nature 158, 202 (1946).
- MECHANIK, N.: Das Venensystem der Herzwände. Z. Anat. EntwGesch. 103, 813 - 840 (1934).
- MOORE, D.H. u. H. RUSKA: Electron microscopic study of mammalian cardiac muscle cells. J. biophys. biochem. Cytol. 3, 261 - 269 (1957).
- MÜLLER, O.: Die feinsten Blutgefäße des Menschen. Ferd.-Enke-Verlag, Stuttgart 1937.
- MÜLLER, A.: Physiologie des Coronarkreislaufs. Cardiologia 40, 62 - 68 (1962).
- MÜLLER-MOHNSEN, H.: Die Topographie der Septumarterien im menschlichen Herzen und ihre Bedeutung für die Entstehung des Kolateralkreislaufs bei Coronarsklerose. Beitr. path. Anat. 118, 121 - 142 (1957).
- MYCZKOWSKI, K.: Morfologia tetnic wiencowych serca zwierzat ssacych. Fol. morph. 1, 92 - 125 (1950).

- MYCZKOWSKI, K.: Tetnic wiencowe serca u niektórych gyrzoni.
Wet. 7, 99 - 144 (1960).
- NUSSBAUM, A.: Über das Gefäßsystem des Herzens. Arch. mikr. Anat.
80, 450 - 477 (1912).
- OHEIM, L.: Herzmuskelveränderungen bei Diphtherie, ihre zeitliche
Aufeinanderfolge und topographische Verteilung. Beitr.
path. Anat. 100, 195 - 231 (1938).
- OPITZ, E. u. M. SCHNEIDER: Über die Sauerstoffversorgung des Ge-
hirns und den Mechanismus von Mangelwirkungen. Ergebn. Phy-
siol. 46, 126 - 260 (1950).
- OPITZ, E. u. D. LÜBBERS: Allgemeine Physiologie der Zell- und
Gewebsatmung. In: Handb. allg. Path. IV, 395 - 496, Sprin-
ger-Verlag, Berlin 1957.
- PADYKULA, H.A. u. E. HERMAN: Factors affecting the activity of
adenosine triphosphatase and other phosphatases as measured
by histochemical techniques. J. Histochem. Cytochem. 3,
161 - 169 (1955).
- PADYKULA, H.A. u. E. HERMAN: The specificity of histochemical me-
thod for adenosine-triphosphatase. J. Histochem. Cytochem.
3, 170 - 195 (1955).
- PFEIFFER, R.: Die Angioarchitektonik der Großhirnrinde. Springer-
Verlag, Berlin 1928.
- POLACEK, P. u. M. AUDRLITZKAJA: (Russischer Titel) Ces. morf. 9,
191 - 199 (1961).
- POLACEK, P.: Mikroskopické sledování svalových mustku a poutek
na lidských venciých tepnach. Ces. morf. 8, 345 - 355
(1960).
- PROVENCA, D.V. u. S. SCHERLIS: Coronary circulation in the dog's
heart. Demonstrations of muscle-sphincters in capillaries.
Circulat. Res. 7, 318 - 324 (1959).
- PUFF, A.: Die funktionelle Bedeutung des elastisch -muskulösen
Systems in den Kranzarterien. Morph. Jb. 100, 546 - 558
(1960).
- PUFF, A.: Funktionelle Besonderheiten im Wandbau der Herznerven.
Verh. Anat. Ges. 59, Erg.-H. 113. Bd., 282 - 295 (1964).

- RENKIN, E.M.: Stofftransport durch die Wände der Blutkapillaren. Klin. Wschr. 41, 147 - 152 (1963).
- REYNOLDS, S.R.M., M. KIRSCH u. R.J. BING: Functional capillary beds in the beating, K Cl-arrested and K Cl-arrested perfused myocardium of the dog. Circulat. Res. 6, 600 - 611 (1958).
- RIBBERT: Beiträge zur pathologischen Anatomie des Herzens. Virchows Arch path. Anat. 147, 193 - 207 (1897).
- ROUX, W.: Über die Bedeutung der Ablenkung des Arterienbaumes bei der Astabgabe. Z. Naturwiss. 6, 321 - 330 (1879).
- RUSHMER, R.F.: Cardiovascular dynamics. W.B. SAUNDERS Co., Philadelphia 1961.
- RUSKA, H.: Der Feinbau von Capillaren. In: Bad Oeynhausener Gespräche VI vom 29. - 30.10.1962, Springer-Verlag, Berlin.
- SAUNDERS, R.L., E.J. LAWRENCE, D.A. MACIVIER u. N. NEMETHY: The anatomic basis of the peripheral circulation in man. In: REIDISH, L., F.F. TANGCO u. C.H. SAUNDERS: Peripheral circulation in health and disease. Grune and Stratton, New York 1957.
- SHIPLEY, R.A., L.J. SHIPLEY u. J.T. WEARN: The capillary supply in the normal and hypertrophical hearts in rabbits. J. exp. Med. 65, 29 - 44 (1937).
- SLOMINSKI, P.: Über die Darstellung winziger Blutgefäße mittels der Benzidinprobe. Z. wiss. Mikr. 44, 1 - 8 (1927).
- SPALTEHOLZ, W.: Die Coronararterien des Herzens. Verh. anat. Ges. Würzburg 1907, 141 - 153.
- SPALTEHOLZ, W.: Zur vergleichenden Anatomie der Aa. coronariae cordis. Verh. anat. Ges. Berlin 1908, 169 - 180.
- SPALTEHOLZ, W.: Die Arterien der Herzwand. Verh. dtsch. Ges. Path. Leipzig 1909, 121 - 124.
- SPALTEHOLZ, W.: Die Arterien der Herzwand. S. Hirzel, Leipzig 1924.
- SCHIEBLER, T.H.: Herzstudie. I. Mitteilung. Histochemische Untersuchungen der Purkinjefasern von Säugern. Z. Zellforsch. 39, 152 - 167 (1953). ;

- SCHIEBLER, T.H.: Herzstudie. II. Mitteilung. Histologische, histochemische und experimentelle Untersuchungen am Atrio-ventrikularsystem von Huf- und Nagetieren. Z. Zellforsch. 43, 243 - 306 (1955).
- SCHIEBLER, T.H., M. STARCK u. R. CAESAR: Die Stoffwechselsituation des Reizleitungssystems. Klin. Wschr. 34, 181 - 183 (1956).
- SCHIEBLER, T.H.: Histochemische Untersuchungen am Reizleitungssystem tierischer Herzen. Naturwissenschaften 48, 502 - 503 (1961).
- SCHIEBLER, T.H.: Orthologie des Reizleitungssystems. In: BARGMANN, W. u. W. DOERR: Herz des Menschen. Thieme-Verlag, Stuttgart 1963, 165 - 227.
- SCHLESINGER, M.J.: An injection plus dissection study of coronary occlusion and anastomoses. Amer. Heart J. 15, 528 - 568 (1938).
- SCHMIDT, H.D. u. J. SCHMIER: Eine Methode zur Darstellung anatomischer Korrosionspräparate; dargestellt am Coronargefäßsystem des Hundes. Z. KreislForsch. 3, 297 - 305 (1966).
- SCHOENMACKERS, J.: Das Coronargefäßbild, seine Technik, Anwendung und Auswertung. Med. Klin. 32, 1009 - 1014 (1949).
- SCHOENMACKERS, J.: Technik der postmortalen Angiographie mit Berücksichtigung verwandter Methoden postmortaler Gefäßdarstellung. Ergebn. allg. Path. path. Anat. 53 - 151, Springer - Verlag, Berlin 1960.
- SCHUMMER, A.: Vereinfachtes Plastoid-Korrosionsverfahren. Anat. Anz. 81, 177 - 224 (1935).
- SCHÜTZ, E.: Über den Einfluß des interventrikulären Druckes auf die Coronardurchblutung. Dtsch. physiol. Ges. Sept. 1955.
- SCHÜTZ, E.: Physiologie des Herzens. Springer-Verlag, Berlin 1958.
- STAUBESAND, J.: Zur Morphologie arterio-venöser Anastomosen. In: Kapillaren und Interstitium. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1955.
- STAUBESAND, J.: Eigenarten des Gefäßmusters bei räumlicher und bei flächenhafter Ausbreitung der arteriellen Strombahn in Organen. Verh. dtsch. Ges. KreislForsch. 22, 263 - 267 (1956).

- STAUBESAND, J.: Funktionelle Morphologie der Arterien, Venen und arterio-venösen Anastomosen. In: M. RATSCHOW: Angiologie. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1959.
- STAUBESAND, J.: Der Raumfaktor als prägendes Prinzip des prae-terminalen Strombahnmusters. Bibl. anat. 1, 317 - 322 (1961).
- STAUBESAND, J. u. F. HAMMERSEN: Zur Problematik des Nachweises arterio-venöser Anastomosen am Injektionspräparat. Z. Anat. EntwGesch. 119, 365 - 370 (1956).
- STAUBESAND, J. u. M. STOCKENIUS: Über die Verwendung von "Netzmitteln" bei der Gefäßinjektion. Z. Anat. EntwGesch. 120, 121 - 123 (1957).
- THEWS, G.: Die O_2 -Diffusion im Gehirn. Pflügers Arch. ges. Physiol. 271, 197 - 226 (1960).
- THEWS, G.: Die Sauerstoffdrucke im Herzmuskelgewebe. I. Mitteilung. Pflügers Arch. ges. Physiol. 276, 166 - 181 (1962).
- TRUEX, R.C. u. M.J. SCHWARTZ: Venous system of the myocardium with special reference to the conducting system. Circulation 4, 881 - 889 (1951).
- TRUEX, R.C. u. A.W. ANGULO: Comparative study of the arterial and venous system of the ventricular myocardium with special reference to the coronary sinus. Anat. Rec. 113, 467 - 491 (1952).
- UNGER, K.: Beitrag zur Kenntnis der Venae cordis minimae (Thebesii) des menschlichen Herzens. Z. Anat. EntwGesch. 108, 356 - 375 (1938).
- WALLS, E.W.: The Development of the specialized conducting tissue of the human heart. J. Anat. 81, 93 - 110 (1948).
- WEARN, J.T.: The role of the Thebesian vessels in the circulation of the heart. J. exp. Med. 47, 293 - 316 (1928 a).
- WEARN, J.T.: The extent in the capillary bed in the heart. J. exp. Med. 47, 273 - 292 (1928 b).
- WOLKOFF, K.: Über die histologische Struktur der Coronararterien des menschlichen Herzens. Virchows Arch. path. Anat. 241, 42 - 48 (1923).

Herrn Professor Dr. med. G. Petry danke ich herzlich für die Überlassung des Themas, die Arbeitsmöglichkeiten im Anatomischen Institut der Universität, sowie für die Unterstützung und Beratung bei der Bearbeitung.

Lebenslauf

Am 1. Juni 1928 wurde ich als einziges Kind des Domänenadministrators Alfred Ludwig und seiner Ehefrau Luise geb. Pfeifer in Johnsdorf Kreis Römerstadt (ČSR) geboren. Von 1934 bis 1938 besuchte ich die Volksschule, von 1939 bis Kriegsende die Oberrealschule für Jungen in Römerstadt. Von November 1944 bis Mai 1945 wurde ich, neben dem Schulunterricht, in einem Lazarett kriegsdienstverpflichtet. Nach Kriegsende war ich elf Monate in einem russischen Gefangenenlager in Uherště Hradišti, danach in einem tschechischen Arbeitslager interniert. Von dort erfolgte im Juni 1946 die Ausweisung aus der Tschechoslowakei. In Deutschland nahm ich an einem Übergangskursus für Kriegsteilnehmer an der Oberschule f. J. in Hann. Münden teil und legte dort am 23. 4. 1947 die Reifeprüfung ab. Danach war ich als Praktikantin am Stadtkrankenhaus in Kassel tätig. Von 1949 bis 1951 absolvierte ich die viersemestrige Ausbildung für medizinisch-technische Assistentinnen in Marburg und bestand am 19.3.1951 die staatliche Prüfung mit der Note "sehr gut".

Während meiner neunjährigen Tätigkeit als med.-techn. Assistentin arbeitete ich von 1951 bis 1953 im histologischen Labor der Univ.-Frauenklinik in Marburg (Dir. Prof. Dr. C. Kaufmann), anschließend bis 1960 als Chefassistentin von Herrn Prof. Dr. H. E. Bock (Dir. der Med. Univ.-Klinik Marburg) vorwiegend auf cytohaematologischem Gebiet. Im Mai 1960 begann ich mit dem Studium der Medizin an der Philipps-Universität in Marburg. Hier legte ich 1961 die naturwissenschaftliche, 1962 die ärztliche Vorprüfung ab und bestand am 11.2.1966 das medizinische Staatsexamen mit der Gesamtnote "sehr gut". Zehn Monate meiner Medizinalassistentenzeit absolvierte ich am Anatomischen Institut der Universität Marburg (Dir. Prof. Dr. G. Petry), danach vier Monate an der Chirurgischen Univ.-Klinik Marburg (Dir. Prof. Dr. M. Schwaiger). Im Juni 1967 übernahm ich die Vertretung des Laboratoriums von Herrn Prof. Dr. Sandkühler in Stuttgart. Anschließend setzte ich die Medizinalassistentenzeit vier Monate an der Städtischen Frauenklinik in Kassel (Dir. Prof. Dr. Pfau) fort.

Nach meiner internen Pflichtzeit werde ich am Anatomischen Institut der Universität Marburg meine Ausbildung fortsetzen.

Meine akademischen Lehrer waren die Herren
Professoren und Dozenten in Marburg:

Beckmann, Berendes, Bickel, Brück, Braun-Falco,
Bucher, Dimroth, Dittrich, Drawert, Exner, Gedigk,
Golenhofen, Grüter, Hamm, Hartmann, Hensel, Heuser,
Hildebrandt, Hornung, Huber, Jacob, Kottmeyer, Linne-
weh, Löhr, Lübbers, Mahr, Martini, Marx, Matthes, Mau-
rath, du Mesnil de Rochemont, Neubauer, Niessing, Oehme,
Oksche, Overbeck, Petry, Rodeck, Rodenheuser, Rohen,
Salfeld, Sauer, Schleyer, Schmid, Schmitz, Schölmerich,
Schrappe, Schultze, Schwaiger, Seidel, Siegert, Siess,
Spiegelberg, Straub, Streicher, Vogell, Vogt, Walcher,
Wendt, Würterle.

